



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

Aktionstag „Sicherer Schulweg“ –
ein Traveling Salesman Problem

verfasst von / submitted by

Anna-Maria Spiwak, BA

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien, 2020 / Vienna 2020

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

UA 066 914

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Internationale Betriebswirtschaft

Betreut von / Supervisor:

O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Richard F. Hartl

Selbständigkeitserklärung

Ich versichere, die vorliegende Arbeit selbständig verfasst zu haben. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Alle von mir für direkte und indirekte Zitate benutzten Quellen sind nach den Regeln des wissenschaftlichen Zitierens angegeben. Mir ist bekannt, dass beim Verstoß gegen diese Regeln eine positive Beurteilung der Arbeit nicht möglich ist. Ich habe die Arbeit bzw. Teile davon weder im In- noch im Ausland zur Begutachtung als Prüfungsarbeit vorgelegt.



Wien, 16.04.2020

Anna-Maria Spiwak

Liste der verwendeten Abkürzungen

ATSP	asymmetrisches Traveling Salesman Problem
CPP	Chinese Postman Problem
CVRP	Capacitated Vehicle Routing Problem
IVE	Intelligent View Editor
KAB	kürzester aufspannender Baum
LP	Linear Programming
MIP	Mixed Integer Problem
RPP	Rural Postman Problem
TSP	Traveling Salesman Problem
VRP	Vehicle Routing Problem
VRPRB	Vehicle Routing Problem mit Route Balancing

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gruppeneinteilung	43
Tabelle 2: Tourenvergleich	46
Tabelle 3: Fertige Touren	47
Tabelle 4: Vergleich der Bäume	50
Tabelle 5: Vergleich der Touren mit Schulwegen	53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: 5 Knoten mit gerichteten Graphen.....	19
Abbildung 2: Hamiltonischer Kreis; Quelle: Applegate et al. 2006.....	20
Abbildung 3: Branch-and-Bound-Verfahren	24
Abbildung 4: Optimale Lösung einer LP-Relaxation; Quelle: Applegate et al. 2006 .	26
Abbildung 5: Cutting-Plane-Verfahren; Quelle: Applegate et al. 2006	26
Abbildung 6: Arten von Bäumen; Quelle: Mattfeld & Varenkamp 2014 ²	27
Abbildung 7: Zielfunktion in Xpress	40
Abbildung 8: Subtour-Eliminations-Bedingungen in Xpress	41
Abbildung 9: Verteilung der Knoten	45
Abbildung 10: berechnete Tour der Gruppe 1	48
Abbildung 11: berechnete Tour der Gruppe 3	48
Abbildung 12: berechnete Tour der Gruppe 8	49
Abbildung 13: Baum der Gruppe 1	51
Abbildung 14: Wald der Gruppe 3	51
Abbildung 15: Baum der Gruppe 8.....	52
Abbildung 16: berechnete Tour der Gruppe 2	54
Abbildung 17: Tour der Gruppe 2 der Gruppenleiter	55
Abbildung 18: Wald der Gruppe 2	55

Inhaltsverzeichnis

Selbständigkeitserklärung	i
Liste der verwendeten Abkürzungen	ii
Tabellenverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis.....	iv
Inhaltsverzeichnis	v
1. Einleitung	1
2. Aktionstag „Sicherer Schulweg“	4
2.1. Ablauf des Projektes	6
2.2. Planung.....	7
2.2.1. Planung der Gruppen	7
2.2.2. Planung der Routen.....	12
3. Tourenplanung.....	15
3.1. Traveling Salesman Problem	17
3.1.1. Lösungsverfahren für das ATSP.....	21
3.1.2. Branch-and-Bound-Verfahren	23
3.1.3. Cutting-Plane-Methode.....	25
3.2. Aufspannender Baum.....	26
3.3. Fairness in der Tourenplanung.....	29
3.4. Lösungssoftware Xpress Optimizer	31
4. Problemstellung.....	33
4.1. Was zeichnet den Aktionstag „Sicherer Schulweg“ als TSP aus?.....	33
4.2. Mathematisches Modell	34
4.2.1. Notation	35
4.2.2. Zielfunktion und Restriktionen.....	35
5. Methode.....	36
5.1. Vorgehensweise	36

5.2. Lösungsstrategie und Notation.....	39
6. Berechnung.....	42
6.1. Datensatz	42
6.2. Ergebnisse	46
6.2.1. Berechnete Touren.....	47
6.2.2. Bäume	49
6.3. Zusammenfassung und Vergleich.....	52
6.3.1. Gruppe 2	53
6.3.2. Kritik.....	55
6.3.3. Besprechung mit der Schulleiterin.....	56
7. Fazit	59
Bibliographie	61
Abstract.....	64
Anhang A.....	65
Anhang B	68
Anhang C	69
Anhang D.....	72
Anhang E	76
Anhang F.....	80

1. Einleitung

In dieser Masterarbeit soll herausgefunden werden, ob die Berechnungsmethoden des Traveling Salesman Problems auch auf anderen Gebieten als den traditionell logistischen angewendet werden können. Es sollen mithilfe des Branch-and-Bound-Verfahrens und der Cutting-Plane-Methode Schulwege von Volksschulkindern berechnet werden.

Heutzutage gehen immer weniger Kinder zu Fuß in die Schule. Die meisten werden von den Eltern mit dem Auto zum Unterricht gebracht. Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken und die Kinder zum Zufußgehen zu animieren wird in einer Volksschule im südlichen Niederösterreich der Aktionstag „Sicherer Schulweg“ abgehalten. Hierfür werden die Kinder der Schule je nach Wohnort in Gruppen aufgeteilt. Diese gehen dann von der Schule zu den Wohnhäusern der Kinder und wieder zurück zur Schule. Das Projekt dient dem besseren Kennenlernen des Schulweges. Darüber hinaus erlernen die Kinder das richtige Verhalten im Straßenverkehr. Die Gruppen werden von der Schulleiterin eingeteilt und die Gruppenleiter*innen erstellen ihre jeweiligen Routen. Dabei wird nach verschiedenen Strategien vorgegangen, jedoch ohne technischer oder logistischer Unterstützung. Der Aktionstag „Sicherer Schulweg“ entspricht einem Traveling Salesman Problem. Normalerweise wird hierbei versucht verschiedene Punkte zu einer möglichst optimalen Route zusammenzufassen. In Bezug auf den Aktionstag, stellt sich die Frage, ob die Touren nicht auf eine effizientere Weise mithilfe der Berechnungsmethoden für ein TSP erstellt werden könnten. Die Touren sollten jedoch drei Anforderungen erfüllen:

1. Die Touren aller Gruppen sollten ungefähr gleich lange sein. Für den Aktionstag stehen vier Schulstunden zur Verfügung und diese sollten auch genutzt werden.
2. Die Touren sollten so nahe wie möglich am tatsächlichen Schulweg der Kinder liegen.
3. Es sollte immer der sicherste Weg gewählt werden.

Es stellen sich daher die folgenden Fragen:

Welche Methoden gibt es, um diesen drei Anforderungen gerecht zu werden?

*Inwiefern können die Touren der Gruppenleiter*innen verbessert werden?*

Die vorliegende Arbeit versucht diese Fragen zu beantworten.

Bei der Beantwortung soll folgendermaßen vorgegangen werden: Die Einteilung der Gruppen wird übernommen, da diese von der Schulleiterin erstellt wurden. Mithilfe des Xpress Optimizers werden die Routen wie ein TSP berechnet. Danach wird versucht mit verschiedenen Methoden die Touren den Anforderungen des Aktionstages anzupassen. Dies wird mittels Farthest Insertion erzielt. Durch optische Beobachtungen, um den sichersten Weg auszuwählen, wird versucht die Strecke möglichst nahe am Schulweg der Kinder zu halten. Im Anschluss werden die entstandenen Touren mit denen der Gruppenleiter*innen verglichen. Es werden alle Touren mit dem tatsächlichen Schulweg der Kinder verglichen, um herauszufinden welche diesem am ehesten entsprechen. Um die Arbeit abzurunden werden alle Touren mit der Schulleiterin besprochen und deren Meinung dazu eingeholt.

Die persönliche Motivation mich mit diesem Thema zu beschäftigen besteht darin, dass ich es sehr wichtig empfinde, dass sich Kinder im Straßenverkehr richtig und sicher verhalten können. Im Zuge des Aktionstages „Sicherer Schulweg“ wird dies erlernt. Darüber hinaus denke ich, dass Kinder wichtige soziale Erfahrungen machen können, wenn sie den Schulweg gemeinsam bewältigen. Mit dem Aktionstag wird versucht die Kinder dazu zu animieren. Es ist mir daher ein Anliegen, die Lehrkräfte bei der Planung und Umsetzung des Projektes zu unterstützen und eventuell den Arbeitsaufwand für zukünftige Aktionstage zu verringern.

Nach der Einleitung wird in Kapitel 2 der Aktionstag „Sicherer Schulweg“ beschrieben. Es werden die pädagogischen Überlegungen und die Planung und Durchführung des Projektes erklärt. Des Weiteren wird die Gruppenzusammenstellung durch die Schulleiterin dargestellt und ihre Überlegungen hierzu. Die Tourenplanung der Gruppenleiter*innen wird ebenso vorgestellt. Ihre Methoden werden präsentiert und die Überlegungen dahinter erörtert.

In Kapitel 3 wird die Tourenplanung erklärt. Insbesondere wird auf das Traveling Salesman Problem eingegangen. Begriffe werden erklärt und verschiedene Lösungsverfahren, wie das Branch-and-Bound und das Cutting-Plane-Verfahren, vorgestellt. Ebenso wird der aufspannende Baum als Methode der Tourenplanung beschrieben und auf die Lösungsmöglichkeiten des kürzesten aufspannenden Baumes näher eingegangen. Es wird erklärt, weshalb Fairness in der Tourenplanung eine große Rolle spielt. Des Weiteren wird der Xpress Optimizer – eine Software zur Lösung von TSP – präsentiert.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Problemstellung der vorliegenden Masterarbeit. Die Eigenschaften, welche den Aktionstag „Sicherer Schulweg“ zu einem Traveling Salesman Problem machen, werden erörtert. Als nächstes wird die mathematische Formulierung des Problems dargestellt. Hierbei wird im Detail auf die verwendeten Variablen, sowie auf die Zielfunktion und die Restriktionen des Problems eingegangen.

In Kapitel 5 wird die genaue Vorgangsweise beschrieben und der methodische Aufbau des praktischen Teiles dieser Arbeit erklärt. Ebenso wird auf die genaue Formulierung und Notation des Problems im Xpress Optimizer eingegangen.

In Kapitel 6 wird zunächst der verwendete Datensatz vorgestellt. Es wird die Aufteilung der Kinder in Gruppen erörtert und die Verteilung der Wohnorte rund um die Schule dargestellt. Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse und somit die fertigen Routen präsentiert. Im darauffolgenden Unterkapitel werden diese berechneten Touren mit den Touren der Gruppenleiter*innen verglichen und einander gegenübergestellt. Es wird erörtert, welche Touren näher am Schulweg der Kinder liegen. Darüber hinaus wird die Meinung der Schulleiterin zu den berechneten Touren wiedergegeben.

Am Ende der Arbeit werden alle gewonnen Erkenntnisse zu einem Fazit zusammengefasst und die zuvor gestellten Fragen beantwortet.

Aus Datenschutzgründen werden weder die Namen noch die Wohnadressen der Kinder genannt. Auch der Ortsname wird bewusst nicht bekannt gegeben. Die Namen der Lehrpersonen und der Schulleiterin werden ebenfalls nicht genannt. Des Weiteren wurde darauf verzichtet, die Touren auf einem Ortsplan in der Masterarbeit darzustellen. Dies dient dem Schutz der Kinder. Da die Arbeit darauf abzielt, zu erörtern, ob es effizientere Methoden zur Tourenplanung gibt, als die derzeitig eingesetzten, ist die Kenntnis über die Örtlichkeiten des Aktionstages nicht unbedingt notwendig. Mit der Schulleiterin und den Gruppenleiter*innen wurden die Touren am Ortsplan besprochen, eventuelle Erwähnungen der Straßennamen in den Interviews wurden weder zitiert noch in anderer Weise in der Arbeit erwähnt.

2. Aktionstag „Sicherer Schulweg“

Das folgende Kapitel befasst sich mit dem Aktionstag „Sicherer Schulweg“. Zuerst wird das Projekt an sich vorgestellt, wie es entstanden ist und wie der Ablauf desselben vorstattengeht.

Das Bildungsministerium und das Land Niederösterreich versuchen mit verschiedenen Projekten und Aktionen die Schulkinder zum Zufußgehen zu animieren und die Verkehrserziehung in den Schulen zu fördern (vgl. Schulleiterin 2019:Z251–264). Der Aktionstag „Sicherer Schulweg“, welcher an einer Volksschule im südlichen Niederösterreich jährlich am Schulanfang im September abgehalten wird, zählt jedoch nicht dazu. Dieser kam auf Initiative einer Pädagogin zustande. Sie brachte die Idee von ihrer ehemaligen Dienststelle mit. Der Aktionstag fand im Schuljahr 2019/20 bereits zum sechsten Mal statt (vgl. Schulleiterin 2019:Z5f u. Z8f).

Wie im Aufsichtserlass des Bildungsministeriums zur Aufsichtspflicht durch Lehrkräfte und andere Aufsichtspersonen zu lesen ist, obliegt die Aufsichtspflicht der Kinder in dem Zeitraum von fünfzehn Minuten vor Unterrichtsbeginn bis „unmittelbar nach Beendigung des Unterrichts beim Verlassen der Schule sowie bei allen Schulveranstaltungen und schulbezogenen Veranstaltungen innerhalb und außerhalb des Schulhauses“ den Lehrkräften oder anderen Aufsichtspersonen (Bundesministerium Bildung, Wissenschaft und Forschung 1997: § 51 Abs. 3 SchUG). Der Schulweg unterliegt der Aufsichtspflicht der Eltern. Schulen sind daher nicht dazu verpflichtet den Kindern ihren Schulweg zu zeigen. Der Aktionstag „Sicherer Schulweg“ wird demnach aus Eigeninitiative abgehalten (vgl. Schulleiterin 2020:Z31–37). Da es sich jedoch bei dem Aktionstag um eine schulische Veranstaltung handelt, liegt die Aufsichtspflicht und damit die Verantwortung, „auf die körperliche Sicherheit und auf die Gesundheit der Schüler zu achten und Gefahren nach Kräften abzuwehren“ bei den Lehrkräften (Bundesministerium Bildung, Wissenschaft und Forschung 1997: § 51 Abs. 3 SchUG).

Im Folgenden wird das Projekt kurz erläutert. Für dieses Projekt werden die Klassenverbände aufgelöst und die Kinder nach ihren Wohnorten in Gruppen eingeteilt. Eine Gruppe besteht aus fünfzehn bis zwanzig Kindern, einer Lehrperson (welche die Gruppenleitung innehat) und einer Begleitperson (diese kann ein Elternteil, ein*e Studierende*r, eine andere Lehrkraft oder eine andere, schulnahe Person sein). Die Gruppen

gehen zu den Wohnhäusern der Kinder und der sicherste Schulweg jedes Kindes wird ermittelt (vgl. Schulleiterin 2019:Z24-Z26).

Mit diesem Projekt möchte die Schulleiterin (2019:Z19-Z22) unterstützen, „dass die Kinder ihren Schulweg zu Fuß bewältigen, sofern das möglich ist, und dann den sichersten Weg wählen. Und auch lernen, sich im Straßenverkehr korrekt zu verhalten.“ Es wird demnach nicht nur zu jedem Schulkind nach Hause gegangen, sondern auch der sicherste Schulweg in Erfahrung gebracht und Verkehrserziehung anschaulich vermittelt. Das richtige Verhalten im Straßenverkehr wird geübt. Kinder, zu deren Wohnhaus als nächstes gegangen wird, dürfen die Zweierreihe anführen. Sie zeigen den Weg und machen vor wie man sich richtig verhält (vgl. Schulleiterin 2019:Z197, Lehrerin 1 und 2 2019:Z87-Z89).

Darüber hinaus werden den verschiedensten Situationen im Straßenverkehr von den Gruppenleiter*innen Aufmerksamkeit geschenkt. Da die Sicherheit des Weges Priorität erhält, fallen gefährliche Abschnitte im Straßenverkehr auf. Ist beispielsweise eine Kurve schwer einsehbar, gibt es auf einer vielbefahrenen Straße keinen Gehsteig oder ist der Gehsteig zu schmal, so wird dies von den Gruppenleiter*innen der Schulleiterin bei der nächsten Teambesprechung mitgeteilt. Diese gibt die Informationen an die Gemeindevertreter*innen weiter und entsprechende Maßnahmen können seitens der Verantwortlichen eingeleitet werden (vgl. Schulleiterin 2019:Z27-Z29). In den vergangenen Jahren wurde bereits in einer Kurve eine Straßenmarkierung verändert und an einer anderen Stelle ein Gehsteig verlängert (vgl. Lehrerin 4 und 5 2019:Z107, Schulleiterin 2019:Z35).

Da auch neue Schüler*innen den sichersten Schulweg kennenlernen sollen, findet der Aktionstag „Sicherer Schulweg“ immer in den ersten Wochen des neuen Schuljahres statt (vgl. Schulleiterin 2019:Z159-Z164). Der Aktionstag wird nur bei Schönwetter abgehalten, jedoch nicht an einem Montag oder Freitag, sondern immer mittwochs oder donnerstags, dies erleichtert die Kommunikation, falls etwaige Planungsänderungen anfallen. Ein Beispiel hierfür wäre eine Schlechtwettervorhersage. So können die Klassenlehrer*innen den Kindern am Tag vor dem Projekt im Unterricht Änderungen mitteilen. Auch können am Tag nach dem Projekt im Unterricht das richtige Verhalten im Verkehr oder bestimmte Situationen noch einmal nachbesprochen werden (vgl. Schulleiterin 2019:Z173-Z176). Die Gruppenleiter*innen sind zumeist auch Klassenlehrer*innen an

der Volksschule. Die Begriffe Gruppenleiter*in, Pädagog*in und Klassenlehrer*in werden demnach in der vorliegenden Arbeit als Synonyme verwendet.

2.1. Ablauf des Projektes

In diesem Kapitel wird der genaue Ablauf des Projektes Aktionstag „Sicherer Schulweg“ geschildert.

Zuerst werden die Kinder der Volksschule von der Schulleiterin in klassenübergreifende Gruppen je nach Wohnort eingeteilt. Diese Gruppeneinteilung wird in einer Konferenz besprochen, um etwaige Fehler zu vermeiden. Von den Klassenlehrer*innen wird überprüft, ob die Kinder ihrer Klassen den richtigen Gruppen zugeordnet wurden und ob die Adressen korrekt sind (vgl. Schulleiterin 2019:Z97 u. Z101-Z103). Da das Projekt nicht nur klassen- sondern auch schulübergreifend abgehalten wird und auch Kinder der sich im selben Haus befindenden Sonderschule an diesem Projekt teilnehmen, wird das Einverständnis zur Betreuung von Kindern mit besonderen Bedürfnissen von den Gruppenleiter*innen eingeholt (vgl. Schulleiterin 2019:Z108-Z112). Danach werden die Erziehungsberechtigten über den Ablauf des Aktionstages informiert. Die Eltern der Kinder in den ersten Klassen erhalten genauere Informationen bezüglich Zweck und Ablauf des Projektes. Die Erziehungsberechtigten der zweiten, dritten und vierten Klassen bekommen nur die Information, an welchem Tag das Projekt stattfindet und was ihr Kind mitbringen muss (vgl. Schulleiterin 2019:Z168-Z171). In Folge werden die Routen von den Gruppenleiter*innen ausgearbeitet. Sowohl die Gruppen- als auch die Routenplanung werden in Kapitel 2.2 näher beschrieben.

Am Morgen des Aktionstages finden sich alle Schüler*innen wie gewohnt in ihren Klassenräumen ein. Nach Unterrichtsbeginn werden die Kinder zu ihren jeweiligen Gruppenleiter*innen geschickt. Dies bedeutet, Kinder, welche Gruppe A zugeordnet wurden, begeben sich in den Klassenraum von Lehrkraft A. Gleichzeitig empfangen die Gruppenleiter*innen die Kinder, welche von den anderen Klassen zu ihnen kommen (vgl. Lehrerin 1 und 2 2019:Z118-Z122). Dabei wird auch darauf geachtet, dass jedes Kind den richtigen Klassenraum findet. So werden beispielsweise die Schüler*innen der ersten Klassen von älteren Schüler*innen abgeholt und in die richtigen Räume begleitet (vgl. Lehrerin 3 2019:Z105-Z108). Ist eine Gruppe vollzählig, wird kurz ein Einblick über die Strecke gegeben und Verkehrsregeln werden besprochen. Im Anschluss stellen sich die Kinder in

einer Zweierreihe an und die Gruppe macht sich auf den Weg (vgl. Lehrerin 1 und 2 2019:Z122-Z131). Von der Schulleiterin selbst wird ebenfalls eine Gruppe geleitet. Diese Gruppe verlässt das Schulgebäude als letzte. Dies dient dem Zweck, dass etwaige Fehler von ihr noch behoben werden könnten. Falls jemand krank ist, kann die Schulleiterin den Ablauf umorganisieren (vgl. Schulleiterin 2019:Z182-Z184). Während des Gehens wird darauf geachtet, dass immer der sicherste Weg gewählt wird und die Kinder sich richtig verhalten; wurde jedes Wohnhaus der Kinder besucht, begibt sich die Gruppe wieder zur Schule. Am Sammelplatz im Schulgarten melden sich die Kinder wieder bei ihren Klassenlehrer*innen zurück. Am Ende des Aktionstages nach der vierten Unterrichtsstunde, um 11:45 Uhr, entlassen die Klassenlehrer*innen ihre Kinder (vgl. Lehrerin 1 und 2 2019:Z142-Z146).

2.2. Planung

Die Planung des Aktionstages „Sicherer Schulweg“ verläuft in verschiedenen Phasen. Generell lässt sich die gesamte Planung in zwei Blöcke gliedern: Block eins stellt die Planungsphase der Gruppeneinteilung dar und wird von der Schulleiterin ausgeführt. Im zweiten Block planen die jeweiligen Gruppenleiter*innen die Route, welche sie mit den Kindern gehen werden. In den folgenden beiden Kapiteln wird auf diese unterschiedlichen Phasen näher eingegangen.

2.2.1. Planung der Gruppen

Am Anfang des neuen Schuljahres werden die Gruppen von der Schulleiterin geplant. Bereits bei der Schuleinschreibung im Frühjahr wird die Wohnadresse der Kinder erfasst. Die Kinder werden von der Schulleiterin je nach Wohnort in Gruppen eingeteilt, da auch die Wohnorte bei der Zusammenstellung der Klassen ein Kriterium darstellen (vgl. Schulleiterin 2019:Z79-Z82). Obwohl die Direktorin der Volksschule ortsansässig ist und daher die meisten Straßen kennt, wird gegebenenfalls Google Maps zu Hilfe genommen, um festzustellen, wo sich eine Wohnadresse genau befindet (vgl. Schulleiterin 2019:Z227-Z229). Dieses Wissen ist für die Gruppenbildung sehr wichtig.

Da das Projekt im Jahr 2019 zum sechsten Mal stattfand, ist eine Orientierung an den Gruppen des Vorjahres möglich. Die Kinder, welche die Schule bereits verlassen haben, werden aus den Gruppen herausgestrichen und die neuen Schüler*innen der ersten Klassen hinzugefügt (vgl. Schulleiterin 2019:Z82-Z85). Dies ist nur eine vorläufige

Einteilung, da nach diesem Schritt die Gruppengröße noch sehr variiert: „Da gibt es halt Gruppen, wo nur 14 Kinder sind und Gruppen wo 22 Kinder sind. Und das passt nicht.“ (Schulleiterin 2019:Z145f.)

Im nächsten Schritt wird überlegt, wie die Gruppen verändert werden könnten, um die Anzahl der Kinder anzupassen. Dies ist eine logische Überlegung zu deren Abwicklung keine Hilfsmittel zur Hand genommen werden. Dies nimmt einige Zeit in Anspruch (vgl. Schulleiterin 2019:Z144ff).

Als nächstes werden die Lehrpersonen den Gruppen zugeordnet. Manche Lehrer*innen haben immer dieselbe Gruppe, andere Gruppen können sich ändern und die Gruppenleiter*innen müssen Strecken übernehmen, welche sie vorher noch nie gegangen sind. Ist die Schulleiterin mit der Einteilung zufrieden, so werden Namens- und Adresslisten zu den einzelnen Gruppen angefertigt. Die Aktualität der Adressen und der Telefonnummern der Erziehungsberechtigten ist wichtig, da erstens die Gruppen zu den richtigen Wohnhäusern gehen sollten und sie sollten den Kindern nicht einen falschen Schulweg zeigen und zweitens, damit im Falle eines Notfalls die Eltern kontaktiert werden können (vgl. Schulleiterin 2019:Z146-Z155).

Bei einer Besprechung werden von den Gruppenleiter*innen und Klassenlehrer*innen die Gruppeneinteilungen inklusive Namens- und Adresslisten kontrolliert, ebenfalls wird die Aktualität der Telefonnummern überprüft (vgl. Schulleiterin 2019:Z156-Z158 u. Z234-Z238). Ist die Gruppeneinteilung in Ordnung, so ist der Prozess abgeschlossen und die Gruppenleiter*innen können beginnen die jeweiligen Routen zu planen. Dies wird im folgenden Kapitel näher erörtert.

Es gibt einige Punkte, auf welche die Schulleitung bei der Einteilung der Gruppen achtet:

- Oberste Priorität hat die Gruppengröße. Eine Gruppe sollte aus circa fünfzehn bis zwanzig Kindern bestehen (vgl. Schulleiterin 2019:Z56f.). Einerseits bräuchte man mehr Begleitpersonen für eine größere Gruppe und andererseits wäre der Weg, den die Gruppe gehen müsste, wahrscheinlich länger.
- Da der Aktionstag „Sicherer Schulweg“ vier Schulstunden dauert, sollte keine Gruppe in viel kürzerer Zeit fertig werden. Die Gruppe mit dem längsten Weg, dies ist jene Gruppe, welche in eine drei Kilometer entfernte Ortschaft geht,

benötigt die ganzen vier Schulstunden. Eine Gruppe, die aber nur zu den Häusern der Kinder in unmittelbarer Umgebung der Schule gehen würde, wäre jedoch nach nur einer Stunde fertig. Der/die Pädagog*in müsste demnach im Anschluss den Unterricht abhalten und sich ein Programm für die gesamte Gruppe überlegen (vgl. Schulleiterin 2019:Z67-Z73). Dies ist zwar „möglich, aber es macht nicht wirklich Sinn“, meint die Schulleiterin (2019:Z73). Aus diesem Grund wird versucht, die Gruppen so zusammenzustellen, dass sowohl die Gruppenstärke als auch die Länge der Touren ungefähr gleich sind. Eine Strategie, welche von der Schulleiterin dazu benutzt wird, um die Länge der Touren aneinander anzupassen ist, dass zum Beispiel das Hinzufügen eines Kindes, das weiter weg wohnt, zu einer Gruppe, welche nur eine kurze Strecke zu gehen hätte. Somit braucht die Gruppe länger und ist nicht zu früh fertig (vgl. Schulleiterin 2019:Z67f.).

- Ebenfalls werden die Wünsche der Eltern berücksichtigt, wenn diese möchten, dass ein Kind den Schulweg zu einem anderen Ort als zum Elternhaus kennenlernen soll. Manche wünschen, dass das Kind zum Haus der Großeltern geht, oder zu dem Ort an dem die Mutter arbeitet (vgl. Schulleiterin 2019:Z104f.).
- In Bezug auf Kinder mit besonderen Bedürfnissen muss berücksichtigt werden, dass diese oft langsamer gehen und wahrscheinlich nicht so weite Strecken zurücklegen können. Hier kann ausgemacht werden, dass das Kind auf halber Strecke abgeholt wird oder nur bis zum Elternhaus mitgeht und nicht mehr zur Schule zurück (vgl. Schulleiterin 2019:Z106f.).
- Auch wird bei der Einteilung darauf geachtet, „dass kein Kind alleine in einer Gruppe ist, in der es niemanden kennt.“ (Schulleiterin 2019:Z51f.) Besonders bei den Kindern der ersten Klassen wird darauf geachtet, dass zumindest ein*e Freund*in des Kindes auch in derselben Gruppe ist oder dass das Kind die Gruppenleitung kennt (vgl. Schulleiterin 2019:Z58-Z61).
- Bei der Einteilung der Gruppen ist auch zu bedenken, dass es nicht mehr Gruppen als Lehrpersonen geben darf. Es sollte immer eine Gruppe weniger geben als Lehrkräfte. Im Krankheitsfall kann dann eine andere Lehrperson einspringen und die Gruppe übernehmen. Schulfremde Personen dürfen keine Gruppen leiten (vgl. Schulleiterin 2019:Z87–94).

- Des Weiteren wird bedacht, welche Begleitpersonen mit einer bestimmten Gruppe mitgehen könnten. Normalerweise wird die Begleitperson von den Gruppenleiter*innen selbst organisiert. Oft fällt die Wahl der Begleitperson auf Eltern, deren Kinder dieser Gruppe zugeteilt sind. Wenn jedoch die Gruppenleitung die Eltern der Kinder nicht kennt, wird von der Schulleiterin eine Begleitperson organisiert. Es könnte jedoch auch sein, dass ein ganz schüchternes Kind sich nicht traut mit einer Lehrperson mitzugehen, die es nicht kennt. In diesem Fall kann die Mutter des Kindes Begleitperson sein (vgl. Schulleiterin 2019:Z62-Z66 u. Z95f.).
- Auch wird überlegt, wo die Gruppen eine Pause machen können. Diese wird von der Schulleitung als Vorschlag an die Gruppenleiter*innen weitergegeben (vgl. Schulleiterin 2019:Z62).

Um einen besseren Überblick zu schaffen sollen die wichtigsten Faktoren hier noch einmal zusammengefasst werden. Es wird darauf geachtet, dass

- die Anzahl der Kinder in allen Gruppen ungefähr gleich ist.
- alle Gruppen eine ungefähr gleich lange Strecke zurücklegen müssen.
- etwaige Wünsche der Eltern berücksichtigt werden.
- jedes Kind mindestens eine*n Freund*in in der Gruppe hat oder dass die Kinder die Gruppenleitung kennen.
- die Gruppen mindestens eine Pause machen können.

Es gibt jedoch auch einige Sonderfälle, bei denen die Gruppeneinteilung nicht einfach vonstatten geht. Da sich das Einzugsgebiet der Volksschule über vier Gemeinden und 20 Kilometer erstreckt, ist nicht jedes Wohnhaus zu Fuß erreichbar. Einige Schüler*innen kommen aus einem Ort, welcher drei Kilometer von der Schule entfernt ist – diese Strecke kann zu Fuß zurückgelegt werden. Jedoch liegen einige Orte weiter entfernt und sind zu Fuß nicht erreichbar. Da die Gegend sehr hügelig ist und einige Kinder auf Bergbauernhöfen wohnen, wäre ein Marsch bis vor die Haustüre den Kindern nicht zumutbar. Diese Kinder legen normalerweise ihren Schulweg mit dem Bus zurück oder werden von den Eltern mit dem Auto in die Schule gebracht und auch abgeholt (vgl. Schulleiterin 2019:Z245f.).

Jene Kinder, zu deren Häusern nicht gegangen werden kann, werden auf die anderen Gruppen aufgeteilt. Dies geschieht jedoch nicht willkürlich, sondern sie werden, wenn

möglich, einer Gruppe zugeteilt, die in Richtung ihres Heimatortes geht. Wenn nun Gruppe 1 in die drei Kilometer entfernte Ortschaft geht, so werden die Kinder, welche in dem weiter entfernt gelegenen Ortsteil, der zu Fuß nicht erreichbar ist, wohnen, dieser Gruppe zugeteilt. Oder Gruppe 2 geht beispielsweise einen Teil der Strecke, des Schulbusses. Die Kinder lernen auf diese Weise einen Teil ihres Schulweges kennen. Auf Grund der Länge kann jedoch nicht der gesamte Weg abgegangen werden. Die Schulleiterin achtet darauf, dass die Kinder jener Gruppe zugeteilt werden, welche den gesamten oder zu mindestens einen Teil ihres Schulweges zurücklegt (vgl. Schulleiterin 2019:Z43-Z50). Ist eine Zuteilung zu einer solchen Gruppe nicht möglich – ein Grund könnte die Gruppengröße sein, da diese, wie bereits erwähnt, eine gewisse Anzahl nicht übersteigen darf – wird das Kind einer Gruppe zugeteilt in der sich ein*e Freund*in befindet (vgl. Schulleiterin 2019:Z51f.).

All jene Gruppen, denen Kinder zugeteilt wurden, welche mit dem Bus fahren, gehen auch zur Bushaltestelle. Der Weg von der Bushaltestelle bis zur Schule und wieder zurück ist ein Teil des Schulweges dieser Kinder und daher verkehrserziehungsmäßig ebenfalls sehr wichtig. Die Gruppenleiter*innen geben besonders darauf Acht, dass das richtige Verhalten an der Bushaltestelle und im Bus mit den Kindern besprochen wird (vgl. Schulleiterin 2019:Z36ff., Lehrerin 4 und 5 2019:Z74ff., Lehrer 9 2019:Z17-Z27).

Bei der Einteilung der Gruppen können Fehler passieren. Es könnte geschehen, dass ein Kind umgezogen ist und die neue Adresse noch nicht im Schülerverwaltungssystem eingetragen wurde. Dann wird das Kind einer falschen Gruppe zugeteilt und es lernt den Schulweg zum neuen Wohnort nicht kennen (vgl. Schulleiterin 2019:Z102f. u. Z65ff.). Ein Nebeneffekt des Aktionstages „Sicherer Schulweg“ ist, dass die Adressen und Telefonnummern aller Schüler*innen auf ihre Aktualität geprüft werden (vgl. Schulleiterin 2019:Z231f.). Ein weiterer Fehler könnte bei der Anzahl der Gruppen unterlaufen, wenn die Zahl der Gruppen die Zahl der verfügbaren Pädagog*innen übersteigt und niemand überbleibt der im Falle einer Erkrankung die Leitung einer Gruppe übernehmen könnte.

Ist die Gruppeneinteilung zur Zufriedenheit aller abgeschlossen, so wird nun mit der Planung der jeweiligen Routen begonnen. Jede*r Gruppenleiter*in plant ihre*seine eigene Route. Auf die unterschiedlichen Strategien und Vorgehensweisen wird im nächsten Kapitel näher eingegangen.

2.2.2. Planung der Routen

Die Planung der genauen Routen wird von den Gruppenleiter*innen selbst vorgenommen. Die meisten Pädagog*innen sind seit dem Beginn des Projektes dabei und sind in der Erstellung ihrer Routen bereits geübt. Jede*r hat sein*ihr eigenes System und eine individuelle Vorgehensweise. Diese unterscheiden sich jedoch nur in den Details voneinander. Ebenso soll in diesem Kapitel erläutert werden, auf welche Faktoren die Gruppenleiter*innen bei der Planung besonders Rücksicht nehmen.

Zunächst werden die Namens- und Adresslisten betrachtet und mit der des Vorjahres verglichen. Die meisten Lehrpersonen sind ortsansässig und kennen die Straßen und Gassen des Ortes. Falls eine Wohnadresse nicht bekannt ist, wird auf Google Maps (vgl. Lehrerin 1 und 2 2019:Z37f., Lehrerin 3 2019:Z40ff., Lehrerin 4 und 5 2019:Z9), oder auf dem Ortsplan (vgl. Lehrerin 6 2019:Z15ff., Lehrerin 7 2019:Z23) die genaue Lage in Erfahrung gebracht.

Für das weitere Vorgehen gibt es unterschiedliche Strategien, welche jedoch alle auf logischen Überlegungen beruhen. Eine Lehrkraft gibt die Adressen in Google Maps ein und formt mithilfe von Zwischenzielen eine Route. Diese Zwischenziele werden so lange verschoben bis die Route ihren Vorstellungen entspricht (vgl. Lehrerin 4 und 5 2019:Z9-Z17).

Eine andere Strategie ist die, von der schulnächsten Adresse ausgehend bis zu der am weitesten entfernten Adresse die Route zu planen (vgl. Lehrerin 7 2019:Z12-Z19). Im Vergleich dazu wird die Route von einer Kollegin genau umgekehrt geplant. Diese plant zunächst das am weitesten entfernte Haus ein und plant danach den Weg von Haus zu Haus wieder zurück zur Schule. Die Überlegung dabei ist, die längste Strecke am Beginn des Aktionstages zurückzulegen, damit wenn die Kinder am Ende des Tages müde werden, sie die weiteste Strecke bereits hinter sich haben (vgl. Lehrerin 8 2019:Z11-Z14). Die meisten Gruppenleiter*innen beachten jedoch folgende Faktoren bei der Zusammenstellung ihrer Route:

- den Schulweg,
- die Sicherheit der Route
- und die Einplanung von Pausen.

- Die Strecke soll möglichst so angelegt sein, dass sie so nahe wie möglich am tatsächlichen Schulweg der Kinder liegt.

Lehrkräfte 1, 2, 3, 4 und 5 planen die Strecke so, „wie ich wollen würde, dass mein Kind in die Schule geht“ (Lehrerin 4 und 5 2019:Z29). Dabei ist es nicht wichtig, in welche Richtung der Weg gegangen wird, sei es von zu Hause in die Schule oder umgekehrt (vgl. Lehrerin 1 und 2 2019:Z21 u. Z40ff.). Es geht weniger darum, den besten Weg zwischen den Wohnhäusern der Kinder zu finden, als darum den Schulweg eines jeden Kindes so gut wie möglich in die Strecke einzubinden (vgl. Lehrerin 3 2019:Z9–12 u. Z97-Z100). Ein weiterer entscheidender Faktor ist die Sicherheit der Strecke. Einige Lehrpersonen entscheiden sich bewusst nicht für den schnellsten oder kürzesten Weg, sondern für den sichersten (vgl. Lehrerin 6 2019:Z26f.). Als gefährliche Strecken oder Gefahrenzonen werden unter anderem die Hauptstraße, Straßen mit fehlenden Gehsteigen, Bahnübergänge, enge, nicht einsehbare Kurven, Baustellen oder Straßen genannt, von denen bekannt ist, dass an jenen Stellen schnell gefahren wird (vgl. Lehrerin 1 und 2 2019:Z48-Z54, Lehrerin 3 2019:Z24-Z29).

Eine ebenfalls wichtige Überlegung bei der Routenplanung ist das Einplanen von Pausen. Hier kommt es meist nicht auf die beste Strecke an, sondern, dass eine Pause eingeplant wird, wenn die Kinder es erfahrungsgemäß brauchen (vgl. Lehrerin 6 2019:Z12ff. u. Z27f., Schulleiterin 2019:Z194f.). Lehrkraft 1 erwähnte, dass sie darauf achte, ob die Strecken vor und nach der Pause ungefähr gleich lange sind (vgl. Lehrerin 1 und 2 2019:Z44ff.). Von anderen Gruppenleiter*innen werden längere Pausen auf Spielplätzen eingeplant, wenn sie nur eine kurze Strecke zu bewältigen haben. So stellen sie sicher, dass sie nicht lange vor den anderen Gruppen fertig werden (vgl. Lehrerin 3 2019:Z35-Z39, Lehrerin 6 2019:Z43-Z46, Lehrerin 7 2019:Z41-Z47). Weiters fragen einige Gruppenleiter*innen bei Eltern ob eine Pause bei ihrem Wohnhaus gemacht werden darf, dies hat auch den Vorteil, dass die Kinder die Toilette benutzen können. Beim Planen der Strecke muss in diesem Fall beachtet werden, dass die Gruppe zum vereinbarten Zeitpunkt beim jeweiligen Haus angekommen ist. Dies hat selbstverständlich Auswirkungen auf die Streckenplanung (vgl. Lehrerin 4 und 5 2019:Z35-Z40, Lehrerin 8 2019:Z42).

Von den beiden Gruppenleiter*innen, welche die weitesten Strecken zu bewältigen haben (Gruppen 1 und 6), wird meistens dieselbe Route gegangen und nur beim ersten

Mal wurde umfassend geplant, da nur eine Straße zu dem ihnen zugewiesenen Ort führt und dort befinden sich die Wohnhäuser der Kinder nahe beieinander (vgl. Lehrer 9 2019:Z9, Schulleiterin 2019:Z182). Einerseits wird die Gruppe danach von den Kindern zu den jeweiligen Häusern geleitet und andererseits wird systematisch vorgegangen ohne diese Planung jedoch ausführlich niederzuschreiben (vgl. Lehrer 9 2019:Z67–70, Schulleiterin 2019:Z196f.).

Als nächster Schritt wird der Weg von vielen Gruppenleiter*innen einmal persönlich abgegangen, um sicher zu sein, dass die geplante Strecke auch mit den Kindern in der vorgegebenen Zeit bewältigt werden kann. Darüber hinaus wird in Erfahrung gebracht, wo man die Straße am besten überquert oder wo eventuelle Gefahrenquellen lauern. Auch wird erörtert, wie viel Zeit ungefähr für die Strecke gebraucht wird. Dies ist auch wichtig um sich zu vergewissern, dass kein Wohnhaus in der Planung vergessen wurde (vgl. Lehrerin 3 2019:Z32f., Lehrerin 7 2019:Z33-Z37). Manche gehen zu Fuß und andere fahren mit dem Rad (vgl. Lehrerin 3 2019:Z74-Z77). Falls die geplante Strecke den Anforderungen nicht entspricht, so wird die Strecke noch einmal abgeändert (vgl. Lehrerin 6 2019:Z20–23, Lehrerin 7 2019:Z49f.). Sind die Strecken zirka unverändert, wurden diese von den Gruppenleiter*innen nur beim ersten Mal abgegangen (vgl. Lehrerin 1 und 2 2019:Z61-Z65, Lehrerin 7 2019:Z26ff.). Es gibt jedoch auch Ausnahmen, bei denen die Gruppenleiter*innen die Strecke jedes Jahr abgehen, um sicherzugehen, dass alle Wohnhäuser eingeplant wurden (vgl. Lehrerin 6 2019:Z38f.). Eine Pädagogin, welche neu an der Schule ist und heuer zum ersten Mal bei dem Projekt dabei war, meinte: „[...] ich war froh, dass ich die Strecke vorher gegangen bin, weil dann war ich mir viel sicherer“ (Lehrerin 8 2019:Z65).

Meistens werden die Routen von den Gruppenleiter*innen noch einmal umgeändert, da sie sich mit dem ersten Entwurf nicht zufrieden geben. Da die Sicherheit der Kinder oberste Priorität hat, kann es zu mehrmaligen Streckenänderungen kommen (vgl. Lehrerin 1 und 2 2019:Z71-Z81, Lehrerin 3 2019:Z50-Z54, Lehrerin 8 2019:Z17–25). Oft spielt auch der Zeitfaktor eine entscheidende Rolle, fällt beim Abgehen der Strecke auf, dass diese zu kurz ist, so wird sie noch einmal geändert (vgl. Lehrerin 7 2019:Z48-Z54). Im Allgemeinen werden von den meisten Pädagog*innen mindestens zwei Anläufe benötigt, bis sie mit der Strecke zufrieden sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die wichtigsten Faktoren, welche bei der Planung beachtet werden, die Sicherheit, das Einplanen der Pausen und die Ähnlichkeit zum Schulweg des Kindes sind. Während der Abhaltung des Aktionstages, wird besonders Wert darauf gelegt, den Kindern das richtige Verhalten im Straßenverkehr zu vermitteln und dieses mit ihnen zu üben.

3. Tourenplanung

In diesem Kapitel sollen die Begriffe der Tourenplanung, das Traveling Salesman Problem und der aufspannende Baum näher erklärt werden. Auch werden verschiedene Lösungsstrategien vorgestellt. Auf die im Zuge der Masterarbeit verwendeten Methoden wird näher eingegangen und eine Software zur Lösung derartiger Probleme wird vorgestellt.

Tourenplanung ist dem Begriff Netzwerkoptimierung untergeordnet. Hierbei wird versucht, Netzwerke so zu planen und zu optimieren, dass die Kosten minimiert werden. Dies geschieht unter Berücksichtigung verschiedenster Restriktionen. Ein Beispiel hierfür wäre der Transport von Waren von den Produzent*innen/Händler*innen zu den Kund*innen. Ein weiteres Beispiel stellt die Planung von Pipelines, Bahnstrecken oder Busumläufen dar. Da diese Netzwerke heutzutage immer komplexer und größer werden, wären sie ohne derartige Lösungsstrategien weder zu bewältigen noch finanzierbar. Besonders bei Fluggesellschaften gibt es viele Gebiete, auf denen die Netzwerkoptimierung angewandt werden kann. Flottenzuordnung, Umlaufplanung sowie die Besatzungseinsatzplanung sind nur einige dieser Anwendungsgebiete. Auch private Navigationssysteme arbeiten mit denselben Optimierungsverfahren. Diese Netzwerkprobleme können als lineare Programme dargestellt werden und mithilfe von eigens dafür entwickelten Algorithmen effizient gelöst werden (vgl. Suhl & Mellouli 2009²:11 u. 23f.).

Unter dem Begriff Tourenplanung versteht sich in der Logistik die Gruppierung von Kund*innen oder Aufträgen zu Touren, welche anschließend in einer bestimmten Reihenfolge bedient werden. Eine Tour ist demnach „eine von einem Transportmittel bediente Menge an Aufträgen“ (Wenger 2010:40). Die Lösung des Problems unterliegt einigen Restriktionen, welche unbedingt beachtet werden müssen. Eine zulässige Lösung besteht aus dem Tourenplan, welcher allen Restriktionen des Problems gerecht wird und die Menge an Touren definiert. Die Reihenfolge, in welcher die Kund*innen bedient

werden, nennt sich Route. Das Tourenplanungsproblem besteht aus zwei Teilen: zum einen, aus der Gruppierung der Aufträge – auch Clustering genannt – und zum anderen, aus der Bestimmung der Reihenfolge, der zu bedienenden Aufträgen – hier spricht man von Routing. Es wird zwischen Cluster-First-Route-Second, Route-First-Cluster-Second oder parallelen Lösungsverfahren unterschieden. Bei Cluster-First-Route-Second werden die Aufträge zuerst gruppiert und danach wird eine optimale Route gesucht, während bei Route-First-Cluster-Second zuerst eine Route gefunden wird und danach die Zuteilung zu Gruppen stattfindet. Bei den parallelen Lösungsverfahren wird simultan geroutet und gruppiert (vgl. Wenger 2010:40).

Das Standardproblem der Tourenplanung ist das Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP). Dabei handelt es sich um ein Tourenplanungsproblem mit Kapazitätsbeschränkungen der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge. Es wird davon ausgegangen, dass alle Aufträge von einem Depot bedient werden. Bei diesem Depot beginnen und enden alle Routen. Jeder Auftrag verlangt einen gewissen Bedarf an gelieferten Gütern, welcher komplett von einer Lieferung befriedigt wird. Zwischen den Standorten der Aufträge bestehen symmetrische Distanzen, diese sind dem Bearbeiter des Problems bekannt. Des Weiteren stehen beliebig viele, homogene Transportmittel zur Verfügung. Jedes dieser Transportmittel verfügt über eine begrenzte Kapazität und kann maximal eine Tour übernehmen. Ziel ist es die benötigte Transportstrecke zu minimieren, das bedeutet, der gesamte, zurückgelegte Weg soll so klein wie möglich sein (vgl. Wenger 2010:41f.). Es können jedoch auch strengere Restriktionen vorliegen. So kann beispielsweise die Anzahl, der zur Verfügung stehenden Transportmittel beschränkt sein oder die Länge der Tour einer vorgegebenen Zeit unterliegen. Des Weiteren können manche Kund*innen nur zu bestimmten Zeiten (time windows) oder nur von bestimmten Transportern bedient werden. Die Kund*innen können auch von mehreren Depots ausgehend bedient werden (vgl. Ghiani et al. 2013²:360f.).

Die Probleme der Tourenplanung können auch als Rundreiseprobleme bezeichnet werden. Ein Netzwerk wird aus einer Menge an Knoten V (zum Beispiel Standpunkte der Kund*innen) und einer Menge an Kanten A (die Verbindungen zwischen den Knoten, also Straßen, Kabel, Schienen etc.) gebildet (vgl. Vahrenkamp 2003:5). In einer Entfernungsmatrix werden die Entfernungen d_{ij} („distance“ zwischen Knoten i und Knoten j) zwischen den Knoten angegeben, dies stellt auch die Längen der Kanten dar. Während die Entfernungen zwischen den Knoten einfach zu recherchieren sind, ist es komplizierter

die wirkliche Fahrtzeit zu berechnen. Diese hängt von der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit ab, welche vom Verkehrsaufkommen beeinflusst wird. Dieses hängt wiederum von der Tageszeit, dem Wochentag und noch einigen weiteren Faktoren ab. Die gesamte zurückgelegte Strecke und infolgedessen auch die anfallenden Kosten sollen minimiert werden. Die Kosten setzen sich einerseits aus den Fixkosten (dies sind zum Beispiel Kosten für die Transportmittel oder Bezahlung der Mitarbeiter*innen) und den variablen Kosten (Kosten, die anfallen, um die ausgewählte Strecke zurückzulegen; beispielsweise Treibstoffkosten oder Straßenmauten) zusammen. (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:221, Ghiani et al. 2013²:361).

Man unterscheidet zwischen kanten- und knotenorientierten Rundreiseproblemen. Wenn jede Kante mindestens einmal besucht werden soll, so spricht man von einem kantenorientierten Problem. Wenn jedoch jeder Knoten mindestens einmal besucht werden soll, dann ist dies ein knotenorientiertes Problem (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:221). Ein kantenorientiertes Problem stellt die Postzustellung, die Schneeräumung auf den Straßen oder die Müllabfuhr dar (so genannte Briefträgerprobleme). Hier gibt es zwei Unterscheidungen: Das Rural Postman Problem (RPP; die Postzustellung in ländlichen Gegenden), bei welchem jede Kante (Straße), die besucht werden muss, mindestens einmal besucht wird – das heißt nicht jede Kante muss in der Endlösung enthalten sein. Und das Chinese Postman Problem (CPP), hier muss jede Kante (Straße) mindestens einmal besucht werden. Ein typisches knotenorientiertes Problem ist die Auslieferung von Waren an Kund*innen. Soll eine Route gefunden werden, welche die gesamten Knoten einschließt und danach wieder zum Ausgangspunkt zurückgekehrt wird, so spricht man von einem Traveling Salesman Problem (vgl. Ghiani et al. 2013²: 359, Suhl & Mellouli 2009²:251). Dieses Problem wird im folgenden Kapitel näher beschrieben.

3.1. Traveling Salesman Problem

Dieses Problem geht davon aus, dass ein Handelsreisender (auf Englisch ein „traveling salesman“) eine gewisse Anzahl an Städten besucht und danach wieder an seinen Ausgangsort zurückkehrt. Die Reise soll so kurz wie möglich sein, daher wird nach der kürzesten Strecke zwischen den einzelnen Städten gesucht (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:229, Suhl & Mellouli 2009²:169). Dieses Problem erscheint simpel, ist jedoch nicht so einfach zu lösen (vgl. Monnot & Toulouse 2010:173). Forscher*innen auf der ganzen Welt und aus den unterschiedlichsten Wissenschaftsgebieten beschäftigen sich intensiv

mit dem TSP und veröffentlichten zahlreiche Studien dazu. Es wird nicht nur in der Logistik, sondern auch in der Genetik, der Telekommunikation und in der Produktion zur Lösung von verschiedenen Problemen angewendet. Es wurde jedoch noch keine universelle, exakte Lösungsstrategie gefunden (vgl. Applegate et al. 2006:1).

Die Anwendungsmöglichkeiten des Traveling Salesman Problems sind vielfältig. Die wohl bekannteste ist die Auslieferung von Waren an Kund*innen, aber auch das Abholen von Milch und der Transport dieser zur Molkerei fällt unter diese Kategorie. Unbekanntere Anwendungsfelder sind die Planung von Lagerarbeiten oder die Führung einer Bohrmaschine durch „eine große Anzahl von Bohrungen“ (Mattfeld & Varenkamp 2014²:229). Es können auch Personen anstelle von Gütern transportiert werden – zum Beispiel bei der Führung eines Linienbusses durch den Stadtverkehr oder beim Transport von Patient*innen von und zu Krankeneinrichtungen (vgl. Suhl & Mellouli 2009²:251).

Wie bei der im vorigen Kapitel beschriebenen Tourenplanung sollen auch beim TSP die Gesamtkosten minimiert werden. In einer Matrix werden vorab die Kosten/Entfernungen berechnet. Es gibt ebenfalls Knoten und Kanten, welche das Depot und die Standorte der Kund*innen und die Straßen dazwischen darstellen. Jedoch wird die Tour nur von einer*m Handelsreisenden oder einem Transportmittel durchgeführt. Auf Grund dessen ist der Ausgangspunkt unerheblich, da die Route dieselbe bleibt, egal von welchem Punkt gestartet wird, solange die Knoten in derselben Reihenfolge abgefahren werden. Dies kann, wie in Abbildung1, folgendermaßen dargestellt werden: Eine Route von 0-1-3-2-4-0 hat dieselbe Länge wie die Route von 3-2-4-0-1-3. Dies ist jedoch eine abstrakte Darstellung, da in der Realität der*die Handlungsreisende vom Depot starten muss, um seine*ihre Ware aufzunehmen und danach an den Ausgangspunkt auch wieder zurückkehren muss (vgl. Suhl & Mellouli 2009²:248f., Mattfeld & Varenkamp 2014²:229f).

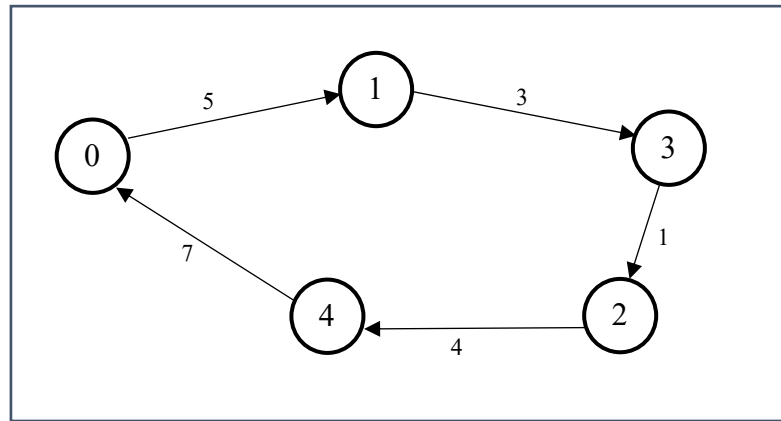


Abbildung 1: 5 Knoten mit gerichteten Graphen

Das Problem lässt sich folgendermaßen definieren: Es gibt eine Menge von Knoten V und eine Menge von Kanten A . Kosten oder Entfernungen c_{ij}/d_{ij} werden jeder Kante ij , welche zwischen den Knoten i und j verläuft, zugeordnet. Dies ergibt einen Graphen G . Man spricht von einem gerichteten Graphen G , wenn die Entfernung von i nach j nicht dieselbe ist wie die von j nach i . Liegt ein solcher gerichteter Graph vor, so handelt es sich um ein asymmetrisches TSP. Dies ist auch der Fall, wenn Kanten nur in eine Richtung passierbar sind, wie im Falle einer Einbahnstraße (vgl. Vahrenkamp 2003:14). Wenn kein gerichteter Graph vorliegt und die Entfernung von i nach j dieselbe ist, wie von j nach i , so liegt ein symmetrisches TSP vor. Nun wird ein hamiltonischer Kreis mit minimalen Gesamtkosten gesucht. Abbildung 1 soll dies veranschaulichen. Die Gesamtkosten ergeben sich aus der Summe der Entfernungen/Kosten der verwendeten Kanten. Ein hamiltonischer Kreis liegt dann vor, wenn jeder Knoten genau einmal besucht wird (vgl. Suhl & Mellouli 2009²:248f., Mattfeld & Vahrenkamp 2014²:229f., Ghiani et al. 2013²:362f.). In Abbildung 2 wird ein solcher hamiltonischer Kreis dargestellt. Die Lösung dieses Problems unterliegt einigen Restriktionen, die auch Nebenbedingungen genannt werden. Eine Restriktion, welche bei allen Traveling Salesman Problemen vorliegt, ist, dass es keine Subtouren geben darf. Das bedeutet, dass in nur einer Tour alle Knoten besucht werden müssen (vgl. Monnot & Toulouse 2010:174).

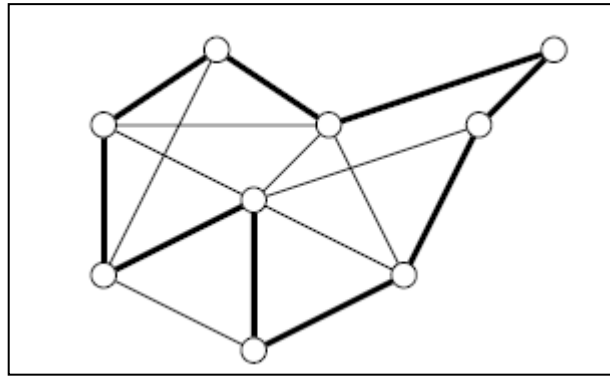


Abbildung 2: Hamiltonischer Kreis; Quelle: Applegate et al. 2006

An dieser Stelle sollen einige Begriffe näher erläutert werden. Am Depot beginnt und endet die Rundfahrt. Das Depot wird entweder mit den Nummern 0 oder 1 bezeichnet und die Kund*innen mit (1), 2, 3, ..., n. Eine Tour bezeichnet die „Menge aller Kund[*inn]en, die auf ein und derselben, in einem Depot beginnenden und in einem Depot endenden Fahrt bedient werden“ (Suhl & Mellouli 2009²:249f.). Unter einer Route versteht man die Reihenfolge, in welcher die Kund*innen einer Tour besucht werden. Der Tourenplan stellt eine zulässige Lösung des Problems dar.

Wie im vorigen Kapitel beschrieben, gelten auch hier einige Voraussetzungen. Die Standorte der Kund*innen und des Depots sowie die Entfernungen dazwischen sind bekannt und in einer Entfernungsmatrix angeführt. Es wird vorausgesetzt, dass die Kund*innen innerhalb einer gewissen Zeit bedient werden. Dies kann beispielsweise einen Arbeitstag umfassen. Ausgehend vom Depot werden die Kund*innen in jener Reihenfolge besucht, in welcher die Gesamtzeit oder die zurückgelegte Entfernung minimiert wird. Kapazitäten können die Gesamtzeit oder die Menge der zu besuchenden Kund*innen einschränken (vgl. Suhl & Mellouli 2009²:249f.).

Das TSP ist ein komplexes Optimierungsproblem. Es ist ein MIP Problem, das heißt ein Problem, welches ganzzahlige Entscheidungsvariablen beinhaltet. Obwohl es einfach zu beschreiben ist, ist es schwierig zu lösen, da eine optimale Tour meistens nur schwer gefunden werden kann. Bei einer Anzahl von n Knoten gibt es $(n-1)!$ alternative Routen. Dies macht das TSP zu einem NP-hartem Problem. Es liegt kein Algorithmus vor, welcher eine polynominale Rechenzeit aufweist. Mit der Knotenzahl n wächst die Berechnungszeit exponentiell (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:229f., Suhl & Mellouli 2009²:168ff.).

In den letzten Jahrzehnten gab es viele Forschungsarbeiten zum TSP (vgl. Suhl & Mellouli 2009²:248f.). Mehrere Forschungsteams versuchten, mithilfe exakter und heuristischer Lösungsverfahren, die optimalen Routen zwischen einer immer wachsenden Anzahl an Städten zu finden. Während 1977 eine optimale Tour zwischen 120 Städten in Deutschland gefunden werden konnte (vgl. Grötschel & Padberg 1999), so wurde nur 30 Jahre später eine optimale Tour zwischen 24.978 Ortschaften in Schweden berechnet (vgl. Applegate et al. 2006). Die Kapazität der Lösungsprogramme ist rasant gewachsen und bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:230, Suhl & Mellouli 2009²:251). Im folgenden Kapitel soll auf die unterschiedlichen Lösungsverfahren näher eingegangen werden.

3.1.1. Lösungsverfahren für das ATSP

Es gibt viele verschiedene Lösungsverfahren für das Traveling Salesman Problem. Einige sind auf das asymmetrische TSP, andere auf das symmetrische und manche auf beide Arten anwendbar. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch nur auf die Lösungsverfahren des asymmetrischen TSPs eingegangen, da das zu lösende Problem ein asymmetrisches ist. Ebenso werden nur Routingverfahren vorgestellt.

Bei den Lösungsverfahren wird generell zwischen Heuristiken und exakten Verfahren unterschieden. Zu der Kategorie der Heuristiken zählen die Tourenkonstruktions-Heuristiken, welche eine möglichst gute Tour konstruieren, und die Verbesserungsheuristiken – diese verbessern eine bereits bestehende Tour. Des Weiteren gibt es Metaheuristiken, welche auf eine Vielzahl von Problemen angewandt werden können (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:247, Domschke & Scholl 2010⁵:103f.).

Zu den **exakten Lösungsverfahren** gehören beispielsweise die Branch-and-Bound-Methode und das Branch-and-Cut-Verfahren. Auf diese beiden Methoden wird in den folgenden zwei Unterkapiteln näher eingegangen. Ein ähnliches Verfahren stellt die Column-Generation-Methode dar. Diese wird auch Branch-and-Price-Methode genannt. Das Problem wird in Teilprobleme zerlegt, um diese lösen zu können wird das Problem vereinfacht indem bestimmte Restriktionen aufgehoben werden. Bei der Branch-and-Price-Methode werden Entscheidungsvariablen, und nicht Restriktionen, nach und nach den Teilproblemen wieder hinzugefügt. Durch Zuhilfenahme von Schattenpreisen wird versucht den Zielfunktionswert zu verbessern und die optimale Lösung zu finden (vgl. Suhl & Mellouli 2009²:254f.).

Zu den **Tourenkonstruktionsheuristiken** zählt unter anderem die Nächster-Nachbar-Heuristik (auf Englisch „Nearest-Neighbour-Heuristic“). Hierbei wird an einem ausgewählten Startknoten immer der Knoten mit der geringsten Entfernung angeschlossen und auf diese Weise eine Route gebildet. Sind alle Knoten in der Route enthalten, wird der Endknoten an den Anfangsknoten angeschlossen und es entsteht eine hamiltonische Tour. Ein Vorteil dieser Heuristik besteht darin, dass sie sehr einfach zu lösen ist. Der Nachteil liegt jedoch darin, dass gegen Ende des Verfahrens häufig nur mehr wenige Knoten zur Verfügung stehen, welche hohe Einfügekosten aufweisen, und somit schlechte Verbindungen entstehen. Außerdem hängt die Qualität der Lösung von der Wahl des Startknotens ab. Um die Qualität zu heben, müssten nun alle Knoten wahlweise als Startknoten gesetzt werden. Das Einfügeverfahren ist ähnlich wie das gerade erklärte Nächster-Nachbar-Verfahren. Hierbei werden noch unbesuchte Knoten in eine Route eingefügt, um die Länge der Tour zu minimieren. Ein Knoten kann bei diesem Verfahren an jeder Stelle der Route eingefügt werden – im Vergleich dazu, wird bei der Nächster-Nachbar-Heuristik der nächste Knoten immer an das Ende der bereits bestehenden Tour angehängt. Auf diese Weise werden alle möglichen Einfügeooptionen berechnet und danach die minimalste ausgewählt. Welcher Knoten als nächstes eingefügt wird, hängt von vorab gewählten Kriterien ab. Es kann zum Beispiel immer der nächste Knoten eingefügt werden, oder jedoch der am weitesten entfernte – dies wird Farthest-Insertion genannt. Es kann auch zufällig ein Knoten ausgewählt werden (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:248–254). Die Patching-Heuristik wird dazu verwendet, aus verschiedenen kleinen Subtouren eine hamiltonische Tour zu kreieren. Als erstes wird das TSP gelöst, jedoch werden dabei einige Nebenbedingungen nicht eingehalten (Relaxationsproblem). Im Anschluss werden nacheinander die entstandenen Subtouren (auch Kurzzyklen genannt) miteinander verbunden. Dabei wird versucht die Gesamtlänge der Tour so klein wie möglich zu halten. Das Verfahren ist beendet, sobald es nur noch eine einzige Rundreise gibt (vgl. Ghiani et al. 2013²:366f., Domschke & Scholl 2010⁵:108f.).

Wie der Name schon sagt, wird mit den sogenannten **Verbesserungsverfahren** versucht, bereits bestehende Lösungen des TSPs zu verbessern. Die Umgebung der bestehenden Tour wird nach Optimierungsmöglichkeiten durchsucht. Man nennt dies Lokale Suchverfahren (auf Englisch „Local Search Heuristics“) oder Nachoptimierung. Eine Option die Umgebung nach besseren Routen abzusuchen, ist Kanten auszutauschen. Dieses Verfahren wird k-opt (oder r-opt) genannt, weil durch den Austausch von einer

Anzahl an Kanten k eine kürzere Route gefunden werden soll. Meist werden nur zwei oder drei Kanten ausgetauscht, so genannte 2-opt oder 3-opt Verfahren. Jedoch kann auch mit einer variablen Kantenzahl versucht werden, eine bessere Lösung zu finden. Ist die neu entstandene Route kürzer als die alte, so wird diese beibehalten. Sobald kein Kanten-austausch eine weitere Verbesserung ermöglicht, wird das Verfahren abgebrochen (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:263, Ghiani et al. 2013²:376f., Suhl & Mellouli 2009²:260, Domschke & Scholl 2010⁵:111).

Metaheuristiken untersuchen eine größere Umgebung nach optimalen Lösungen als andere Lösungsverfahren. Sie lösen sich von lokalen Optima ab und können so ein globales Optimum finden. Während dieses Prozesses kann es jedoch auch zu einer kurzzeitigen Verschlechterung des Zielfunktionswertes kommen. Unter der Tabu Search wird ein 2-opt-Verfahren verstanden. Hierbei werden bei jedem Iterationsschritt gewisse Kanten Tabu gesetzt, das bedeutet diese dürfen nicht vertauscht werden. Auf diese Weise wird eine andere Umgebung durchsucht und neue Lösungsmöglichkeiten entstehen. Zu der Gruppe der Metaheuristiken wird auch die Large Neighborhood Search gezählt. Hierbei werden zuerst Verbindungen zerstört und danach wieder neu zusammengefügt. Beim Simulated Annealing wird vier Mal getauscht, danach wird die Lösung durch 3-opt oder einen Lin-Kernighan-Algorithmus verbessert. Die so erhaltene Lösung kann entweder als neue optimale Lösung akzeptiert werden oder es werden weitere Veränderungen durchgeführt. Diese Metaheuristiken werden als nachbarschaftsorientierte Ansätze bezeichnet. Unter populationsbasierten Ansätzen werden Ameisenalgorithmen oder Genetische Algorithmen verstanden (vgl. Domschke & Scholl 2010⁵:119).

In den folgenden zwei Kapiteln wird auf zwei exakte Verfahren näher eingegangen, welche für die vorliegende Arbeit von größerer Bedeutung sind. Diese sind das Branch-and-Bound-Verfahren und die Cutting-Plane-Methode.

3.1.2. Branch-and-Bound-Verfahren

Wie bereits erwähnt, gehört die Branch-and-Bound-Methode zu den exakten Lösungsverfahren. Die meisten der anderen exakten Lösungsverfahren basieren auf dieser Methode. Bei diesem Verfahren, welches für Probleme mit ganzzahligen Entscheidungsvariablen konzipiert ist, wird das ursprüngliche Problem in kleinere Teilprobleme zerlegt, welche gesondert voneinander untersucht werden – dies nennt sich Branching. So entsteht ein Entscheidungsbaum an dessen Ästen sich jeweils die Teilprobleme verzweigen. Eine

untere und eine obere Schranke grenzen die Lösungsmöglichkeiten der Teilprobleme ein. Die unteren Schranken werden mithilfe von Relaxationen, also das Außerachtlassen von Nebenbedingungen, bestimmt. Die niedrigste bislang gefundene Lösung des TSPs wird als obere Schranke festgesetzt. Wenn die Lösungen der Teilprobleme diese Schranken überschreiten, so sind sie nicht zulässig und der Verzweigungsprozess ist an dieser Stelle zu Ende. Dies wird auch Bounding genannt (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:268–271, Domschke & Scholl 2010⁵:7–15). In Abbildung 3 wird der Entscheidungsbaum dargestellt.

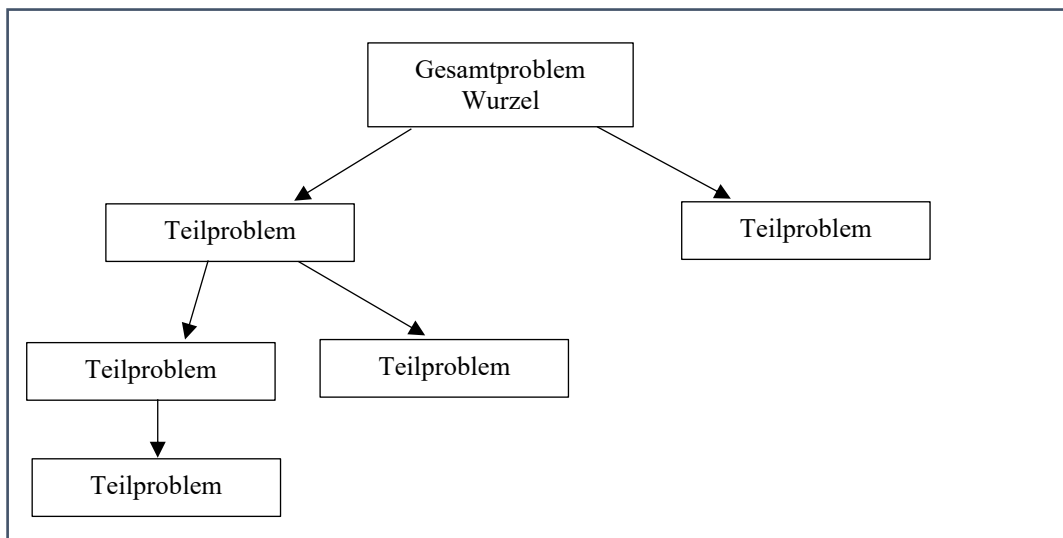


Abbildung 3: Branch-and-Bound-Verfahren

Der Erfolg dieser Methode ist von zwei Regeln abhängig:

1. Die Selektionsregel bestimmt, an welchem Blatt des Baumes das Problem weiter aufgespalten wird.
2. Die Verzweigungsregel führt die Kriterien an, nach welchen ein Blatt aufgespalten wird, um den Baum möglichst klein zu halten.

Das Verfahren ist dann zu Ende, wenn keine Teilprobleme mehr vorhanden sind und eine optimale Lösung gefunden wurde. Es kann jedoch auch schon zuvor die optimale Lösung gefunden worden sein, wenn ein Teilproblem das Minimum bei einer zulässigen Lösung an einer anderen Stelle im Entscheidungsbaum annimmt (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:268–271, Domschke & Scholl 2010⁵:7–15, Suhl & Mellouli 2009²:151f.).

Das Verfahren, welches die unteren Schranken bei der Branch-and-Bound-Methode bestimmt, nennt sich LP-Relaxation. LP steht für Linear Programming und

bezeichnet demnach die Linearität eines Problems. Meist wird hierbei die Nebenbedingung, welche eine ganzzahlige Lösung voraussetzt, kurzzeitig aufgehoben (vgl. Suhl & Mellouli 2009²:153f.). Es können jedoch auch andere Nebenbedingungen aufgehoben werden, wie beispielsweise die Bedingungen, welche Subtouren verhindern. Durch die Aufhebung dieser Nebenbedingungen werden Subtouren zugelassen, welche durch das Verbot der in den Subtouren enthaltenen Kanten „sukzessive zu einer Rundreise vereinigt werden“ (Mattfeld & Varenkamp 2014²:271). Das heißt, dass im Laufe des Verfahrens die aufgehobenen Nebenbedingungen und Restriktionen nach und nach wieder hinzugefügt werden und so am Ende eine optimale, zulässige Lösung entsteht.

3.1.3. Cutting-Plane-Methode

Die Cutting-Plane-Methode wurde von Dantzig, Fulkerson und Johnson (1954) entwickelt. Wie beim Branch-and-Bound-Verfahren werden verschiedene Relaxationen auf ein Problem angewandt und das Problem vorläufig gelöst. Dadurch ergibt sich eine Lösung, welche als Schranke für das weitere Verfahren genutzt wird. Durch nachträgliches Hinzufügen sogenannter Schnittebenen, auch Cuts genannt, findet eine Annäherung an die optimale Lösung statt. Cuts sind Ungleichungen, also Nebenbedingungen, welche von der optimalen Lösung erfüllt werden müssen. Durch das Hinzufügen dieser, werden nicht zulässige Lösungen ausgeschlossen. Nachdem eine neue Bedingung hinzugefügt wurde, wird das Problem erneut gelöst. So findet ein Herantasten an die optimale Lösung statt. Es ist zwar möglich alle benötigten Restriktionen vorab zu kennen, jedoch würde die große Anzahl der benötigten Bedingungen, um alle Subtouren auszuschließen und so eine ganze Tour zu bekommen, den Rechenaufwand erheblich steigern. Bei der Cutting-Plane-Methode wird aus diesem Grund eine Restriktion erst dann hinzugefügt, wenn sie auch wirklich benötigt wird (vgl. Applegate et al. 2006:89 u. 137f.). In den folgenden zwei Abbildungen wird dieses Verfahren bildlich dargestellt.

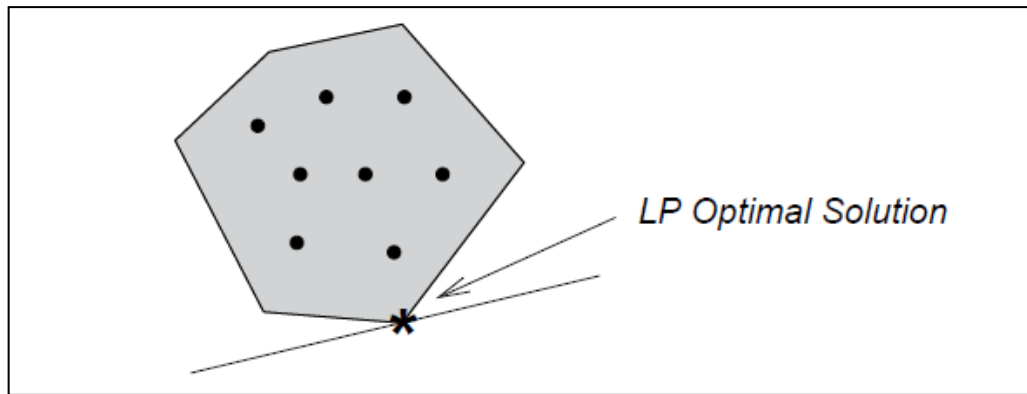


Abbildung 4: Optimale Lösung einer LP-Relaxation; Quelle: Applegate et al. 2006

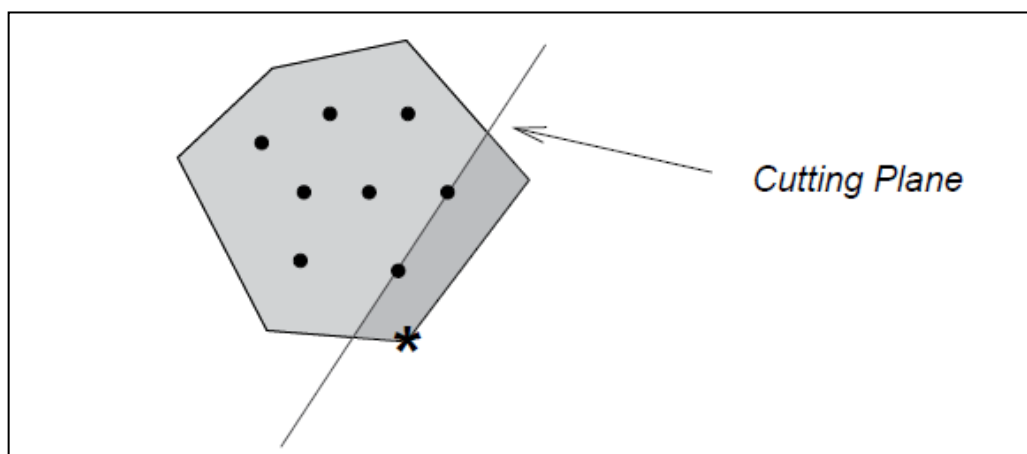


Abbildung 5: Cutting-Plane-Verfahren; Quelle: Applegate et al. 2006

Wird die Cutting-Plane-Methode mit dem Branch-and-Bound-Verfahren kombiniert, dann wird die neue Lösungsmethode Branch-and-Cut genannt. Der Rechenaufwand verringert sich bei dieser Methode. Als Beispiel dieser Lösungsmethode kann für das asymmetrische Problem das Verfahren von Balas und Christofides (1981) genannt werden (vgl. Suhl & Mellouli 2009²:253, Domschke & Scholl 2010⁵:19).

3.2. Aufspannender Baum

Eine weitere Möglichkeit der Tourenplanung ist die Erstellung eines Baumes. Im Gegensatz zu einer Rundreise, wird hierbei die Anzahl der Kanten minimiert. Diese Art der Tourenplanung findet zum Beispiel bei der Straßenplanung oder bei der Verlegung von Kabeln Anwendung. Auf Grund der Minimierung der Kantenanzahl werden auch die Kosten minimiert. Alle Knoten sollen an das Netzwerk angeschlossen sein, jedoch entsteht dabei kein Zyklus. Knoten werden als Blätter bezeichnet. Befinden sich in einem

Netzwerk mehrere Bäume, so wird dieses als Wald bezeichnet (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:26, Suhl & Mellouli 2009²:173).

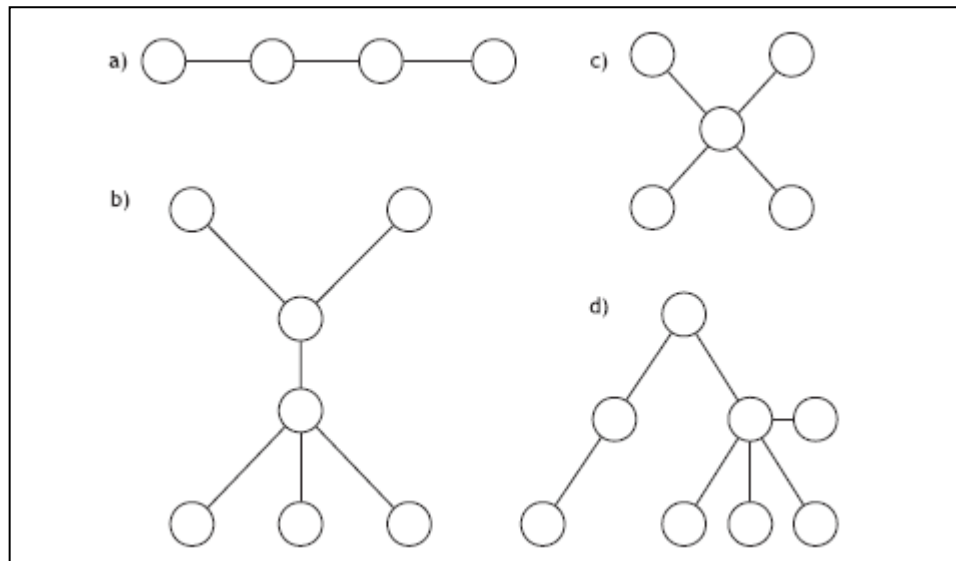


Abbildung 6: Arten von Bäumen; Quelle: Mattfeld & Varenkamp 2014²

Es gibt verschiedene Arten von Bäumen, einige davon sind in der Abbildung dargestellt. Zwei Ausprägungen sollen hier vorgestellt werden. Bei einer linearen Kette (Abbildung 6a) liegt an jedem Ende des Baumes jeweils ein Blatt. Bei einer Zentralstruktur hingegen sind alle Blätter mit einem zentralen Knoten verbunden (Abbildung 6c). Diese wird als Hub bezeichnet und findet besonders im Flugverkehr oder in der Konstruktion von Bahnnetzen Verwendung. Alle lokalen Passagiere werden zu einem zentralen Knoten geleitet und dann mit Fernverbindungen zu weiter entfernten Zielknoten gebracht. Die Paketlogistik arbeitet ebenfalls nach dieser Methode (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:27–30).

Der Knoten, welcher als Anfangsknoten dient, wird Wurzel genannt (Abbildung 6d). Da alle weiteren Knoten Nachfolger des Wurzelknoten sind, kann ein Baum auch zur Darstellung von Hierarchien genutzt werden. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist der Stammbaum, welcher alle Nachfahren eines Elternpaares angibt. Als weitere Beispiele lassen sich das Organigramm und der Entscheidungsbaum nennen. Das zuvor beschriebene Branch-and-Bound-Verfahren kann zu den Entscheidungsbäumen gezählt werden. Hierbei spaltet sich jedes Blatt in zwei weitere Blätter – dies wird auch Binärbaum genannt. Auch Suchmaschinen wie beispielsweise Google arbeiten mit Hilfe eines solchen Suchbaumes (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:27–30).

Ein Baum liegt vor, wenn folgende Charakteristika zutreffen:

- Alle Knoten sind in das Netzwerk integriert, der Baum ist somit zusammenhängend.
- Es bestehen keine Zyklen.
- Immer zwei Knoten sind über genau eine Kante verbunden und es gibt bei einer Anzahl von n Knoten genau $n-1$ Kanten.
- Wird eine Kante entfernt, so zerfällt das Netzwerk in zwei Teilbäume.
- Liegt ein bewerteter Baum vor, so tragen die Kanten verschiedene Gewichte. Dies können zum Beispiel die Kosten eines zu verlegenden Kabels oder die Entfernung zweier Knoten sein (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:27–36, Suhl & Mellouli 2009²:174–177).

Ist ein Baum gerichtet, dann liegt eine klare Hierarchie vor. Zum Beispiel die Abfolge von Projekten. Als Shortest-Spanning-Tree oder auch als kürzester aufspannender Baum (KAB) wird ein Baum bezeichnet, dessen Kanten bewertet sind, jedoch kein gerichtetes Netzwerk vorliegt. Es werden jeweils die Kanten verwendet, welche die kürzeste Entfernung zwischen zwei Punkten darstellen (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:27–36, Suhl & Mellouli 2009²:174–177). Die Gesamtlänge des Baumes ergibt sich durch die Kosten summierung der verwendeten Kanten.

Nun werden einige Lösungsverfahren für aufspannende Bäume vorgestellt. Das einfachste Lösungsverfahren ist, einen Startknoten auszuwählen und danach alle weiteren Knoten in beliebiger Reihenfolge anzuhängen bis der Endknoten erreicht ist. Da aber in den meisten Fällen die Gesamtlänge des Baumes minimiert werden soll, muss auf verschiedene Faktoren Rücksicht genommen werden. Die zwei bekanntesten Verfahren zur Bildung von kürzesten aufspannenden Bäumen sind das Verfahren von Prim und jenes von Kruskal. Diese beiden sollen im Folgenden vorgestellt werden.

Beim Verfahren von **Prim** wird der Baum schrittweise aufgebaut. Die Kante mit den geringsten Kosten wird als Anfangsbaum festgelegt. Anschließend wird jener Knoten angehängt, dessen Kante als Verbindung zum bereits bestehenden Baum die geringsten Kosten aufweist. Das Verfahren ist beendet, wenn alle Knoten in den Baum integriert sind (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:36, Suhl & Mellouli 2009²:177).

Im Gegensatz dazu werden beim **Kruskal-Algorithmus** zunächst mehrere Bäume konstruiert und dieser Wald wird danach zu einem einzigen Baum zusammengeschlossen. Bei diesem Verfahren werden jeweils die Kanten mit den minimalsten Kosten benutzt. In einer aufsteigenden Liste werden die Kanten nach ihren Kosten sortiert. Aus den Kanten mit den minimalsten Kosten werden Bäume gebildet. Wurden $n-1$ Kanten verwendet, so bricht der Algorithmus ab und der Baum ist fertiggestellt (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:37, Suhl & Mellouli 2009²:176f.).

Im nächsten Kapitel wird die Bedeutung des Begriffs der Fairness in Zusammenhang mit der Tourenplanung erklärt.

3.3. Fairness in der Tourenplanung

Der Begriff Fairness entstammt dem englischen Wort „equity“ und bezeichnet in der Tourenplanung das Ziel, diese möglichst fair zu gestalten. Ziele, die hierbei verfolgt werden, könnten zum Beispiel die faire Verteilung von Arbeitsaufwand oder die gerechte Zuordnung von Ressourcen sein. Unter Arbeitsaufwand kann Unterschiedliches verstanden werden, dies kann entweder die Tourenlänge, in Gesamtzeit oder Gesamtdistanz, oder die Anzahl der zu beliefernden Kund*innen sein.

In den letzten zwei Jahrzehnten wurden verschiedene Modelle und Methoden entwickelt, um diese Fairness-Bedingungen in der Tourenplanung optimal miteinzubeziehen. Die Logistik kann mehrere Zielsetzungen gleichzeitig verfolgen. Diese Eigenschaft wird „multiobjective“ genannt. Bei Logistikproblemen aus der Arbeitswelt kann oft nicht nur ein Ziel, das der Kostenminimierung, verfolgt werden (vgl. Matl et al. 2018a:239). Auch nicht materielle Faktoren beeinflussen die Entscheidungsfindung und den Erfolg einer Firma. Dies sind unter anderem die Qualität des Services, die Kund*innenzufriedenheit und die Vertrauenswürdigkeit. Des Weiteren kann die Zufriedenheit der Mitarbeiter*innen durch eine gerechte Verteilung des Arbeitsaufwandes gesteigert werden und so eine bessere Qualität im Service erzielt werden.

Ein weiteres Anwendungsfeld für Fairness-Bedingungen stellt die Tourenplanung von Schulbussen dar. Hierbei ist nicht nur die Minimierung der Tourenlänge wichtig, sondern auch die Verringerung der Anzahl der Busse. Ebenfalls sollte die Anzahl der zu transportierenden Kinder ungefähr gleich sein. Parkscheinkontrollen, die Einteilung von

Rettungskräften, öffentliche Verkehrsmittel oder die Einteilung der Müllabfuhr zählen ebenfalls zu solchen Problemen (vgl. Matl et al. 2018a:243, Matl et al. 2018b:2).

Trotz des großen Interesses an diesem Thema, gibt es nicht viele Publikationen und Modelle wie diese Fairness-Bedingung in die Zielfunktion des VRPs eingebunden werden können (vgl. Matl et al. 2018a:239). Es bleibt unklar, welche Konsequenzen eine Zielfunktion mit Bezug auf Fairness wirklich hat. Matl et al. (2018a:240) sind der Meinung, dass bei praktischen Anwendungen immer Kompromisse eingegangen werden müssen.

Ein VRP, bei welchem die Routen an einander angeglichen werden sollen, wird als „Vehicle Routing Problem with Route Balancing“ bezeichnet, kurz VRPRB. Die VRPRB lassen sich in drei Kategorien einteilen, je nachdem welche Ressourcen fair verteilt werden sollen. In der ersten Kategorie soll die Distanz oder die Länge der Tour angeglichen werden. In der zweiten werden die Nachfrage oder die Menge, der auszuliefernden Waren einander angepasst. Und in der dritten Kategorie hat die Anzahl der Kund*innen oder der Halte Priorität (vgl. Matl et al. 2018b:4).

In der Literatur finden sich verschiedene Zugänge zu diesem Problem. So wird zum Beispiel von einem VRP mit beschränkten Kapazitäten ausgegangen und Fairness in die zweite Zielfunktion integriert. Eine weitere Möglichkeit ist, die Zeitfenster, in welchen Kund*innen beliefert werden können, zu erweitern. Andere wiederum benutzen nur eine Zielfunktion, bei der Fairness die größte Rolle spielt. Diese verfolgen einen „min-max-Zugang“, was bedeutet, dass die maximale Route minimiert wird. Ebenfalls können obere und untere Schranken eingefügt werden, um die Tourenlängen einander anzupassen (vgl. Matl et al. 2018a:240 u. 244f.). Matl et al. (2018a:257f.) schreiben, dass in den meisten Fällen die längste Tour doppelt so lange ist wie die kürzeste. Jedoch existieren oft Lösungen, welche die Tourenlängen mit geringen Kosten einander anpassen. Laut ihrer Studie kann dies durch einen Austausch der Knoten zwischen den Touren erzielt werden.

Im folgenden Kapitel soll eine Software vorgestellt werden, welche zur Tourenplanung genutzt werden kann.

3.4. Lösungssoftware Xpress Optimizer

Es gibt viele verschiedene Softwares, welche die Berechnung von komplexen Problemen ermöglichen. Im Folgenden wird jedoch nur auf jenes Programm eingegangen, welches im Rahmen dieser Arbeit auch zur Berechnung und Lösung des vorliegenden Problems herangezogen wird. Dies ist der Xpress Optimizer. In diesem Kapitel werden die einzelnen Komponenten des Programms beschrieben und die Anwendung derselben erläutert.

Xpress Optimizer ist eine Software, welche sich aus vier Komponenten zusammensetzt: Xpress Insight, Xpress Executor, Xpress Solver und der Xpress Workbench. Xpress Insight stellt Modelle zur Anwendung von Optimierungen zur Verfügung. Xpress Executor dient als Unterstützung zur Arbeit mit diesen Optimierungen. Xpress Solver umfasst verschiedene Algorithmen und Technologien, mit deren Hilfe sich lineare, gemischt-ganzzahlige und nicht-lineare Probleme lösen lassen. Mit Xpress Workbench lassen sich Modelle erstellen, welche der Unterstützung der anderen Komponenten dienen (vgl. FICO 2019a). Zur Berechnung des TSP der vorliegenden Arbeit wurde die Xpress IVE, eine „Graphical User Interface“, verwendet. Dies ist eine Anwendung, mit welcher der Xpress Optimizer in einer benutzerfreundlichen Darstellung angewandt werden kann.

Der Xpress Solver, und infolgedessen auch die IVE, arbeiten mit der Mosel-Sprache. Diese ist sehr nahe an der mathematischen Schreibweise. Außerdem können die verschiedensten Algorithmen in dieser Sprache geschrieben werden. Als Hilfe zur korrekten Formulierung kann die Xpress Workbench herangezogen werden. Wie zuvor erwähnt, können mit dem Solver lineare, gemischt-ganzzahlige und nicht-lineare Probleme gelöst werden. Daten können in einem eigenen Dokument abgespeichert und dann in das zu lösende Problem integriert werden. Weiters besitzt das Programm auch die Kapazität eine Lösung grafisch darzustellen. Auch kann es mit Statistik Softwares verbunden werden, wie beispielsweise mit R oder Matlab (vgl. FICO 2019b).

Die Xpress IVE besteht aus verschiedenen Komponenten. Am linken Rand befindet sich die „Project Pane“, auf welcher der Fortschritt des Projektes und die verschiedenen Abschnitte der Modellierung überblickt werden können. In der Mitte ist das Arbeitsdokument, auf welchem das Modell geschrieben wird. Am rechten Rand ist die „Run Pane“, hier werden die Ergebnisse sichtbar. Zur Darstellung dieser muss jedoch im Modell ausdrücklich erwähnt werden, wie diese dargestellt werden sollen. Am unteren Rand werden

Informationen bezüglich des geschriebenen Modells angezeigt. Befindet sich darin ein Fehler, so wird hier sichtbar um welchen Fehler es sich handelt und in welcher Zeile des Modells sich dieser befindet.

Zu Beginn wird das Modell benannt. Der Name selbst ist für das Programm nicht von Bedeutung. Als Nächstes werden die verwendeten Bibliotheken, welche zur Lösung des Problems herangezogen werden, angegeben. In den meisten Fällen wird dies durch „uses “`mmxprs`““ dargestellt. In den darauffolgenden „Declarations“ wird dem Problem eine Struktur verliehen und alle vorkommenden Variablen erklärt. Diese können entweder ganze oder reelle Zahlen sein, aus einem Text bestehen oder wahr beziehungsweise falsch sein. Werden die Daten aus einem eigenen Dokument entnommen, so muss dies ebenfalls in einem „Initialisations“-Block angegeben werden. Danach wird die Zielfunktion definiert und alle Nebenbedingungen werden angegeben. Das Ende des Modells wird durch „end-model“ angegeben. Um zur Problemlösung zu gelangen, wird die Starttaste gedrückt und das Programm beginnt die Angaben zu berechnen. Liegt in der Angabe kein Fehler vor, so wird das Ergebnis auf der „Run Pane“ dargestellt (vgl. Modeling with Xpress).

Im Xpress Optimizer sind bestimmte Lösungsverfahren bereits eingebettet. Das heißt, bei der Lösung eines Problems wird auf bestimmte Verfahren und Algorithmen zurückgegriffen, ohne dass diese vom Benutzer explizit im Modell erwähnt werden. Der Xpress Optimizer benutzt das Branch-and-Bound-Verfahren, sowie die Cutting-Plane-Methode, um MIP-Probleme zu lösen. Die Kombination dieser beiden Methoden führt zu einer schnellen Lösungsfindung. Es sollte jedoch erwähnt werden, dass die Performance des Solvers dennoch von der Formulierung des Modells abhängt. FICO Xpress Optimization (2019:20) rät demnach, dass Benutzer*innen verschiedene Formulierungen an kleineren Problemen ausprobieren, bevor sie sich an das richtige Problem heranwagen.

Der Xpress Optimizer beinhaltet eine Strategie, welche die Branch-and-Cut-Methode in den meisten Fällen eine optimale Lösung finden lässt. Die Qualität der Lösung hängt von zwei Entscheidungen ab: die Selektionsregel bestimmt an welchem Teilproblem der Baum weiter verzweigt wird, und die Art der Cuts kann die Anzahl der Teilprobleme signifikant verringern (vgl. FICO Xpress Optimization 2019:22f.).

Verschiedene Komponenten sind in den Optimizer integriert, um die Suche nach der optimalen Lösung bestens an das jeweilige Problem anzupassen. So wird die Priorität

der Reihenfolge der zu erforschenden Teilprobleme durch einen Wert indiziert, dessen Spanne in den Programmcode von Xpress integriert ist. Diese Spanne beträgt zwischen 400–500 und das Teilproblem mit dem niedrigsten Wert wird priorisiert. Des Weiteren werden Pseudokosten für jedes Blatt des Entscheidungsbaumes berechnet, diese können auch als Schattenkosten bezeichnet werden. In diesem Fall bezeichnen Schattenkosten den Wert, um welchen sich die Lösung des Problems verändern würde, wenn die Lösung dieses Teilproblems gewählt werden würde. Da die Berechnung dieser Pseudokosten sehr zeitintensiv ist, greift der Optimizer auf bereits berechnete Pseudokosten eines anderen Blattes zurück. Der Optimizer greift automatisch auf verschiedene Arten von Cuts zurück, um die Anzahl der zu verzweigenden Teilprobleme gering zu halten (vgl. FICO Xpress Optimization 2019:22f.). An welchem Blatt das Teilproblem weiter verzweigt werden soll und wann die Suche abgebrochen wird, unterliegt bestimmten Befehlen, welche ebenfalls in den Optimizer integriert sind und vom Benutzenden nicht in das Modell geschrieben werden müssen (vgl. FICO Xpress Optimization 2019:23f.).

Ist der*die Benutzer*in unzufrieden mit dem Lösungsverfahren des Xpress Optimizers, so kann dieses an die unterschiedlichsten Interessen angepasst werden (vgl. FICO Xpress Optimization 2019:20). Durch das Anwenden bestimmter Befehle können die eingebetteten Lösungsstrategien außerkraftgesetzt werden. Jedoch muss der/die Benutzer*in in diesem Fall das gesamte gewünschte Verfahren in sein*ihr Modell integrieren und genauestens beschreiben.

4. Problemstellung

Die Problemstellung der vorliegenden Arbeit wird in diesem Kapitel erläutert. Es wird erklärt, warum der Aktionstag „Sicherer Schulweg“ als TSP angesehen werden kann. Des Weiteren wird die mathematische Formulierung eines TSPs genau beschrieben. In den darauffolgenden Kapiteln wird näher auf die Vorgangsweise und die verwendete Methode zur Berechnung der Routen eingegangen.

4.1. Was zeichnet den Aktionstag „Sicherer Schulweg“ als TSP aus?

Der Aktionstag „Sicherer Schulweg“ weist alle Eigenschaften eines TSPs auf, obwohl er nicht dem klassischen Transport Problem entspricht. Der Startpunkt, die Schule, kann als Depot gelten und die Wohnhäuser der Kinder stellen die Kund*innenstandpunkte dar. Das Depot und die Wohnhäuser lassen sich auch als Knoten beschreiben. Die Kanten

stellen die Straßen und Wege zwischen den Knoten dar. In einer möglichst guten Route sollen alle Häuser besucht werden, um anschließend wieder zum Ausgangspunkt zurückzukehren. Die Gruppen wurden so belassen, wie diese die Schulleiterin zusammengestellt hatte. Auf die Gruppenzusammensetzung und die getroffenen Überlegungen hierfür wird in Kapitel 5 näher eingegangen. Da allen Gruppen für das Zurücklegen der Strecke vier Schulstunden zur Verfügung stehen, sollten diese auch genutzt werden. Es ist daher nicht zulässig nur die kürzeste Route zu wählen, sondern es muss darauf geachtet werden, dass auch Pausen zu geeigneten Zeitpunkten abgehalten werden. Die ausgewählten Strecken sollten möglichst nah am tatsächlichen Schulweg der Kinder liegen und darüber hinaus ist dem sichersten Weg oberste Priorität zu geben. Diese Bedingungen sind in einem klassischen TSP nicht zu finden.

Bei der Planung der Routen wenden die Gruppenleiter*innen unterschiedlichste logistische Verfahren an, ohne diese zu kennen. So bedienen sich einige der Farthest Insertion und andere der Nearest Neighbour Methode. Die Gruppenleiter*innen berechnen weder die genaue Länge der Routen noch erstellen sie eine Entfernungsmatrix. Sie fügen lediglich jene Adresse, welche ihrer Meinung nach die gewünschten Kriterien erfüllt, als nächstes in ihre Route ein.

Es stellt sich die Frage, inwiefern die Berechnung der Routen für den Aktionstag „Sicherer Schulweg“ als TSP effizienter wäre, als die Zusammenstellung der Routen durch die Gruppenleiter*innen. Außerdem kann die Frage gestellt werden, inwieweit die Routen an den wirklichen Schulweg der Kinder angepasst werden können. Um die Routen dem Schulweg anzunähern wurden verschiedene Methoden getestet.

4.2. Mathematisches Modell

Im folgenden Kapitel wird die mathematische Formulierung des Traveling Salesman Problems mit asymmetrischen Distanzen angeführt. Das TSP ist ein lineares Problem, welches sich als MIP-Problem formulieren lässt. Für die Berechnung der Routen aller Gruppen wurde dieses Modell verwendet. Die Notation basiert auf dem Werk von Ghiani et al. (2013²:363f.). Folgende Daten und Variablen wurden für die Lösung des Problems benötigt.

4.2.1. Notation

Parameter:

A bezeichnet die Menge der Kanten, $A = \{1, \dots, n\}$

V bezeichnet die Menge der Knoten, $V = \{1, \dots, m\}$

d_{ij} bezeichnet die Distanz, um von einem Knoten i zum anderen Knoten j zu gelangen. Wenn die Kante ij benutzt wird, fallen ebendiese Distanzen an. Im asymmetrischen TSP sind diese Distanzen nicht symmetrisch, dies bedeutet, dass die Distanzen von i nach j nicht gleich sind wie von j nach i .

Entscheidungsvariablen:

x_{ij} gibt an, ob die Kante ij benutzt wird oder nicht: Es ist eine binäre Variable, welche den Wert 1 annimmt, wenn die Kante in der Lösung enthalten ist; und 0, wenn sie in der Lösung nicht benutzt wird.

4.2.2. Zielfunktion und Restriktionen

Das Problem mit der Zielfunktion

$$\text{minimiere } \sum_{(ij) \in A} d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

unterliegt den Bedingungen

$$\sum_{i \in V \setminus \{j\}} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \quad (3)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \notin S} x_{ij} \geq 1 \quad \forall S \subset V, |S| \geq 2 \quad (4)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset V, |S| \geq 2 \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V \quad (6).$$

Die Zielfunktion (1) minimiert die Summe der anfallenden Distanzen. Dies bedeutet, dass die kürzest mögliche Route gewählt wird. Bedingungen (2) und (3) sorgen dafür, dass eine Route entsteht. Durch die Bedingung (2) wird angegeben, dass jeder Knoten exakt

einmal besucht werden muss. Im Gegensatz dazu wird von der Bedingung (3) angegeben, dass jeder Knoten exakt einmal verlassen werden muss. Durch diese beiden Restriktionen wird sichergestellt, dass jeder Knoten an das entstehende Netzwerk angeschlossen wird. Alle anderen Restriktionen verhindern Subtouren. Bedingung (4) bedingt, dass jeder Knoten einmal an einen anderen angeschlossen wird. So werden Touren verhindert, welche nur einen Knoten beinhalten. Restriktion (5) sorgt dafür, dass von jeder Subtour mindestens ein Knoten mit einem Knoten, der nicht in dieser Subtour enthalten ist, verbunden sein muss. Anders gesagt: „Für jede echte Teilmenge S von N müssen die Knoten von S mit den anderen Knoten im Netzwerk zusammenhängen. Eine Subtour mit Knoten nur aus S wird damit verhindert“. (Suhl & Mellouli 2009²:253) Es werden $2^{|V|} - |V| - 2$ Subtour-Eliminierungs-Restriktionen benötigt, da die Zahl der möglichen Subtouren mit der Anzahl der Knoten exponentiell ansteigt (vgl. Mattfeld & Varenkamp 2014²:238f.). Restriktion (6) definiert die Entscheidungsvariablen.

5. Methode

In diesem Kapitel wird die gewählte Methode beschrieben. Die genaue Vorgangsweise wird erklärt und auch auf die Hintergründe der verschiedenen Entscheidungen wird eingegangen. Des Weiteren wird die Formulierung des Modells im Xpress Optimizer beschrieben und das Verfahren Farthest Insertion erläutert.

5.1. Vorgehensweise

Aufgrund der zahlreichen Faktoren, welche bei der Planung der Gruppen von der Schulleiterin berücksichtigt werden, wird von einer Neustrukturierung derselben abgesehen. Zu diesen Faktoren zählen unter anderem:

- Es muss immer mindestens ein*e Freund*in mit in der Gruppe sein.
- Kinder, welche mit dem Bus fahren, müssen in Gruppen eingeteilt werden, welche im Zusammenhang mit ihrem Wohnort stehen
- Es darf nicht mehr Gruppen als zur Verfügung stehende Gruppenleiter*innen geben.

Diese sozialen Komponenten sind für außenstehende Personen unmöglich miteinzubeziehen.

Zunächst wird mit Hilfe von Google Maps für jede Gruppe eine Entfernungsmatrix erstellt. Hierbei wird beachtet, dass jeweils der sicherste Weg zwischen den Knoten herangezogen wird. Aufgrund der hügeligen Gegend handelt es sich um ein asymmetrisches Problem, da mehr Zeit dafür benötigt wird, um bergauf zu gehen als bergab. Mit dem Xpress Optimizer werden dann die Routen aller Gruppen berechnet. Hierbei wird als Zielfunktion angegeben, dass die Gesamtlänge zu minimieren ist. Als Lösungsverfahren werden das Branch-and-Bound-Verfahren, die Cutting-Plane-Methode und im Zuge deren ein Subtour-Eliminations-Algorithmus angewandt. Im Kapitel 5.1 wird genauer auf die gewählte Notation und Lösungsstrategie eingegangen.

Im Anschluss werden die Routen mit den Gruppenleiter*innen besprochen. Da diese noch einmal erwähnen, dass es sehr wichtig sei, die Routen so nahe wie möglich an den Schulweg der Kinder zu bringen, alle Gruppen ungefähr auf die gleiche Länge anzugleichen und den sichersten Weg zu wählen, müssen diese noch einmal überarbeitet werden. Nach der Berechnung mit Xpress weisen alle Touren unterschiedliche Längen auf. Die längste Tour beträgt nach dieser Berechnung 73 Minuten. Es wird angenommen, dass die Gruppe alle vier Schulstunden für die Zurücklegung dieses Weges benötigt. Google Maps nimmt bei der Berechnung der Wegzeiten an, dass ein*e Erwachsene*r diese Distanz zurücklegt. Kinder gehen jedoch langsamer und eine Gruppe von Kindern benötigt noch mehr Zeit, um dieselbe Strecke zurückzulegen. Des Weiteren werden am Aktionstag auch Pausen eingelegt:

- Mindestens eine Pause muss an einem geeigneten Ort mit einer vorhandenen Toilette abgehalten werden.
- Vor jedem Haus wird der Schulweg des Kindes noch einmal besprochen.
- Vor jedem Zebrastreifen, jeder Straßenüberquerung und jeder schwer einsehbaren Kurve wird ein Stopp eingelegt, um die Situation und das richtige Verhalten zu erklären.
- Wird eine unklare Situation im Straßenverkehr vorgefunden, so wird diese ebenfalls besprochen.

Auf Grund dieser Faktoren kann die genaue Gehzeit nicht berechnet werden. Sollte es zu einer Zeitknappheit kommen, so müssen die bereits eingeplanten Pausen verkürzt werden.

Die kürzeste berechnete Tour beträgt 36 Minuten, dies ist fast die Hälfte der längsten Tour. Es wird nun versucht, die Länge der Touren einander anzugleichen. Als obere

Schranke wird die längste berechnete Tour definiert – 73 Minuten. Und als untere Schranke wird eine Zeit von 60 Minuten gewählt. Um die Touren einander anzugleichen werden zwei verschiedene Methoden angewandt:

1. Unterschiedliche untere Schranken werden in Xpress eingefügt, um die Touren künstlich zu verlängern. Im Normalfall ist dies nicht erwünscht und führt zu keiner optimalen Lösung. Hier wird jedoch von der Schulleiterin ausdrücklich darauf hingewiesen, dass kürzere Touren verlängert werden sollen. Es werden verschiedene untere Schranken angewandt, um die Ergebnisse vergleichen zu können. Als untere Schranken werden 60, 65, 70 und 73 Minuten angegeben.
2. Es wird versucht, Gruppen zwischendurch nochmals zur Schule zurück zu führen. Das heißt, anstatt in einer Tour alle Häuser einer Gruppe zu besuchen, wird die Strecke in Subtouren aufgespalten, welche alle die Schule als Ausgangspunkt haben. Dies hat den Vorteil, dass die ausgewählte Strecke näher am Schulweg der Kinder liegt. Der Aufenthalt bei der Schule kann unter anderem dazu genutzt werden bei Bedarf die Toiletten zu besuchen oder eine kurze Pause einzulegen. Wann so eine Subtour eingeführt werden soll, wird mittels Farthest Insertion ermittelt, da die Strecke verlängert werden soll.

Die Ergebnisse dieser zwei Berechnungsarten werden in einer Tabelle zusammengefasst und die Touren werden auf ihre Sinnhaftigkeit und Sicherheit hin untersucht. Unter sinnvollen Touren wird in diesem Fall eine Route verstanden, welche immer zuerst zum ersten Haus in einer Straße führt und danach erst zu den folgenden. Begründet wird dies damit, dass die Kinder verwirrt wären, wenn an ihrem Haus vorbeigegangen werden würde. Um eine möglichst sichere Strecke zu erhalten, soll die Hauptstraße so weit wie möglich gemieden werden. Außerdem sollen große und unübersichtliche Kreuzungen umgangen werden. Straßen und Gassen mit Gehsteigen sind auszuwählen. Des Weiteren sollen, falls vorhanden, Baustellen gemieden werden. Diese Untersuchung der Touren basiert auf optischen Beobachtungen. Zu diesem Zweck werden alle berechneten Routen mit Hilfe eines Ortsplans analysiert. Zu gefährliche oder unlogische Routen werden als nicht zulässig markiert. Von den zulässigen Touren werden jeweils die längsten zur weiteren Bearbeitung ausgewählt.

Im nächsten Schritt werden die ausgewählten Touren händisch einander angepasst. Dies geschieht unter Rücksichtnahme der drei wichtigsten Faktoren:

- Nähe zum Schulweg,
- Sicherheit der Route
- und Angleichung der Tourenlängen.

Aufgrund optischer Beobachtungen und logischer Überlegungen werden drei verschiedene Methoden angewandt, um die Touren zu optimieren und an die Anforderungen anzupassen. Einerseits werden durch Vertauschung der Knoten nicht zulässige Routen wieder zulässig gemacht. Andererseits werden weitere Pausen eingefügt, um die Strecke zu verlängern und einige Gruppen werden noch einmal zurück zur Schule geführt. Wie bereits zuvor sollen alle Touren auf eine Länge zwischen 60 und 73 Minuten gebracht werden. Die längste Tour ist jedoch nicht zulässig und durch einen Knotenaustausch verlängert sie sich um eine Minute. Deshalb wird die obere Schranke an 74 Minuten angepasst.

Im folgenden Schritt werden die fertigen Touren mit den Gruppenleiter*innen besprochen. Ebenso wird prozentuell berechnet für wie viele Schüler*innen der tatsächliche Schulweg, bei den so erstellten Touren, auch gegangen wird. Diese werden mit den Touren der Gruppenleiter*innen verglichen.

Um die Touren dem tatsächlichen Schulweg der Kinder so weit wie möglich anzugleichen und den sichersten Schulweg zu wählen, wird mit Hilfe des Ortsplans für jede Gruppe ein Baumdiagramm erstellt. Hierbei wird der sicherste Schulweg für jedes Kind ermittelt, wenn möglich, werden diese Strecken zu einem Baum zusammengefasst. Es wird nun davon abgesehen eine zusammenhängende Rundreise für jede Gruppe zu erstellen. Diese Bäume dienen der Darstellung der tatsächlichen Schulwege der Kinder.

Im folgenden Kapitel wird näher auf die Formulierung des Modells im Xpress Optimizer eingegangen und erklärt wie Farthest Insertion auf das Problem angewendet wird.

5.2. Lösungsstrategie und Notation

Die Berechnung erfolgt mit dem Xpress Optimizer. Da in dieses Programm das Branch-and-Bound-Verfahren und die Cutting-Plane-Methode eingebettet sind, muss nicht mehr explizit erwähnt werden, dass das Programm diese Verfahren anwenden soll. Dies erleichtert die Formulierung des Modells und vereinfacht die Schreibweise. Für jede Gruppe werden zwei Dokumente erstellt: in ersterem finden sich die Daten zu der jeweiligen Gruppe und in zweiterem die Formulierung des Modells, dieses endet auf „.mos“.

Die Daten der jeweiligen Gruppe müssen für den Optimizer lesbar gemacht werden. Zu diesem Zweck wird ein „dat“-Dokument erstellt, welches die Entfernungsmatrix enthält. Es ist wichtig, dass der Name des „mos“-Dokuments, welches diese Daten zur Berechnung verwenden soll, angegeben wird.

Im nächsten Schritt wird das Modell in einem „mos“-Dokument geschrieben. Wie im Kapitel 3.1.5 beschrieben, muss dem Modell ein Name gegeben werden. Die Modelle aller Gruppen unterscheiden sich nur in wenigen Punkten. Im Namen wird die jeweilige Gruppe erwähnt: „Tour planning Route 5“ ist der Name des Modells für Gruppe 5. Das „dat“-Dokument wird ebenso mit der Gruppennummer beschriftet. In den „declarations“ wird die Anzahl der zu besuchenden Knoten angegeben, diese unterscheidet sich je nach Gruppe. Weiters muss definiert werden aus welchem Dokument das Programm die Daten entnehmen soll. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, wird die Zielfunktion definiert und die wichtigsten Bedingungen werden angeführt.

```
!Zielfunktion: minimiere die Gesamtlänge
TotalDIST:= sum(i,j in HOMES | i<>j) DIST(i,j)*walk(i,j)

!jedes Haus soll einmal besucht werden
forall(i in HOMES) OneVisitI(i):= sum(j in HOMES | i<>j) walk(i,j) = 1
forall(j in HOMES) OneVisitJ(j):= sum(i in HOMES | i<>j) walk(i,j) = 1

forall(i,j in HOMES | i<>j) walk(i,j) is_binary

!minimiere die Zielfunktion
minimize(TotalDIST)

!Eliminiere Subtouren
break_subtour
```

Abbildung 7: Zielfunktion in Xpress

Nun ist das Grundmodell fertig erstellt. Beliebige man es dabei, so entstünden mehrere Subtouren. Es wird jedoch eine zusammenhängende Rundreise benötigt, daher müssen diese Subtouren zu einer Tour zusammengefasst werden. Zu diesem Zweck wird im nächsten Schritt die „Procedure break-subtour“ in das Modell integriert. Hierbei müssen wieder alle verwendeten Variablen definiert werden. Durch konkret angegebene Befehle, integriert der Optimizer das nächste Haus in die Route. Die kürzeste Subtour wird gesucht und in Folge dessen werden die anderen Knoten in diese integriert.

Um die bestehenden Subtours zu eliminieren, müssen bestimmte Restriktionen dem Modell hinzugefügt und das Problem neu gelöst werden. Diese Subtour-Eliminations-Bedingungen sind auf Abbildung 8 zu sehen.

```

!eine subtour breaking constraint
sum(i in SMALLEST) walk(i,NEXTH(i)) <= getsize(SMALLEST) - 1

!auch in die andere Richtung muss die Subtour verboten werden
if SMALLEST.size>2 then
    sum(i in SMALLEST) walk(NEXTH(i),i) <= getsize(SMALLEST) - 1
end-if

!subtour elimination constraint
sum(i in SMALLEST,j in HOMES-SMALLEST) walk(i,j) >= 1

!löse das Problem noch einmal
minimize(TotalDIST)

```

Abbildung 8: Subtour-Eliminations-Bedingungen in Xpress

Im Anschluss muss beschrieben werden, wie der Optimizer die Lösung darstellen soll. Es wird angegeben, wie die Gesamtlänge und die Reihenfolge der Knoten in einer Tour dargestellt werden sollen. Des Weiteren wird das Modell geschlossen und somit als vollständig erklärt.

Bei der Farthest Insertion wird jeweils eine Kante aus der Route herausgenommen und dann die Schule dazwischen eingefügt. Dies kann mittels der Formel

$$-d_{ij} + d_{i0} + d_{0j}$$

dargestellt werden. Um diesen Betrag ändert sich dann die Gesamtlänge der Tour. Um die Touren zu verlängern, werden die neuen Routen mit einer Gesamtlänge von 60 bis 73 Minuten zur weiteren Berechnung verwendet.

Bei der Erstellung der Bäume, wird auf dem Stadtplan für jedes Kind der sicherste Schulweg erörtert. Es wird nicht der kürzeste aufspannende Baum gesucht, sondern jeweils der sicherste. Die Bäume werden also nicht von der Schule ausgehend geplant, sondern immer der sicherste Weg vom Haus zur Schule gesucht. Dies führt dazu, dass Bäume entstehen, welche jeweils den individuellen, sicheren Schulweg eines Kindes repräsentieren. In den meisten Fällen treffen sich diese Schulwege an gewissen Stellen, wie

Kreuzungen und dergleichen. Nur selten gibt es einen Baum, welcher nur den Schulweg eines einzelnen Kindes darstellt.

Im folgenden Kapitel soll die Berechnung der Routen präsentiert werden. Es werden die verwendeten Daten erklärt und die Ergebnisse vorgestellt.

6. Berechnung

In diesem Kapitel sollen zuerst die zur Berechnung verwendeten Daten, sprich die Wohnadressen der Kinder (die Knoten), vorgestellt werden. Es werden die einzelnen Gruppen erklärt und die Verteilung der Adressen rund um die Volksschule dargestellt. Die unterschiedlichen Ergebnisse werden verglichen. Eine Zusammenfassung wird am Ende des Kapitels gegeben.

6.1. Datensatz

Insgesamt besuchen 165 Schüler*innen die Volksschule. Davon können 54 Kinder ihren Schulweg nicht zu Fuß bewältigen und werden bestimmten Gruppen zugeteilt. Von den verbleibenden 111 Schüler*innen weisen 31 denselben Wohnort auf wie andere, manche davon sind Geschwister oder wohnen in derselben Wohnhausanlage. Insgesamt wurden daher 80 Adressen in den Berechnungsvorgang einbezogen. Die Schule stellte diese Daten zur Verfügung. Alle Schüler*innen der Volksschule wurden von der Schulleiterin auf neun Gruppen aufgeteilt. Jede Gruppe besteht aus 15 bis 20 Kindern. In der vorliegenden Arbeit werden jedoch nur jene Kinder berücksichtigt, deren Adressen tatsächlich aufgesucht werden. Die verbleibenden 85 Schüler*innen werden außer Acht gelassen. Zusätzlich zu den Wohnadressen werden noch die Schule – als Ausgangspunkt – die Bushaltestelle und eventuelle Pausenstationen als weitere Stopps hinzugefügt. Die folgende Tabelle zeigt die neun Gruppen mit den zu berechnenden Daten und der Knotenanzahl jeder Gruppe.

Gruppe 1 11 Knoten	Schule 2 Pausen 8 Adressen von Schüler*innen
Gruppe 2 12 Knoten	Schule Bushaltestelle 10 Adressen von Schüler*innen
Gruppe 3 10 Knoten	Schule 1 Pause Bushaltestelle 7 Adressen von Schüler*innen
Gruppe 4 17 Knoten	Schule 1 Pause Bushaltestelle 14 Adressen von Schüler*innen
Gruppe 5 9 Knoten	Schule Bushaltestelle 7 Adressen von Schüler*innen
Gruppe 6 13 Knoten	Schule 1 Pause Bushaltestelle 10 Adressen von Schüler*innen
Gruppe 7 10 Knoten	Schule 1 Pause Bushaltestelle 7 Adressen von Schüler*innen
Gruppe 8 13 Knoten	Schule 2 Pausen Bushaltestelle 9 Adressen von Schüler*innen
Gruppe 9 11 Knoten	Schule 1 Pause Bushaltestelle 8 Adressen von Schüler*innen

Tabelle 1: Gruppeneinteilung

Gruppe 2 und Gruppe 5 machen die Pause bei Schüler*innen zu Hause. Gruppe 1 geht aus Zeitgründen als einzige Gruppe nicht zur Bushaltestelle, da sich diese in entgegengesetzter Richtung zum Wohnort der Kinder befindet. Alle Gruppen beinhalten eine unterschiedliche Anzahl an Knoten, welche zu einer Route zusammengefasst werden. Die Anzahl der Kinder ist jedoch in allen Gruppen zirka gleich groß.

Mit Hilfe von Google Maps wird für jede Gruppe eine Entfernungsmatrix erstellt. Bei der Erstellung dieser wird darauf geachtet, nur jene Kanten zu benutzen, welche die

sicherste Verbindung zwischen zwei Knoten darstellen. Im Anhang findet sich als Beispiel die Entfernungsmatrix der Gruppe 3.

Abbildung 9 zeigt die Verteilung der Adressen rund um die Schule. An den Koordinaten (0/0) befindet sich die Volksschule, diese ist mit dem Depot eines klassischen TSPs gleichzusetzen. Alle Punkte, welche in derselben Farbe wie die Schule gekennzeichnet sind (in der Legende Basis genannt), stellen keine Wohnorte der Schüler*innen dar, sondern Spielplätze, an denen Pausen abgehalten werden. Diese können je nach Position auch mehreren Gruppen gleichzeitig zugeordnet sein. Die Bushaltestelle (an Position (1,8/-3,9)) wird ebenso von fast allen Gruppen besucht. Im Anhang findet sich eine Tabelle mit den Koordinaten aller Knoten. Um überprüfen zu können, welcher Knoten das Wohnhaus welches Kindes darstellt, wurden die Kinder mit Nummern versehen.

Im nächsten Kapitel sollen die Ergebnisse der Berechnungen präsentiert werden.

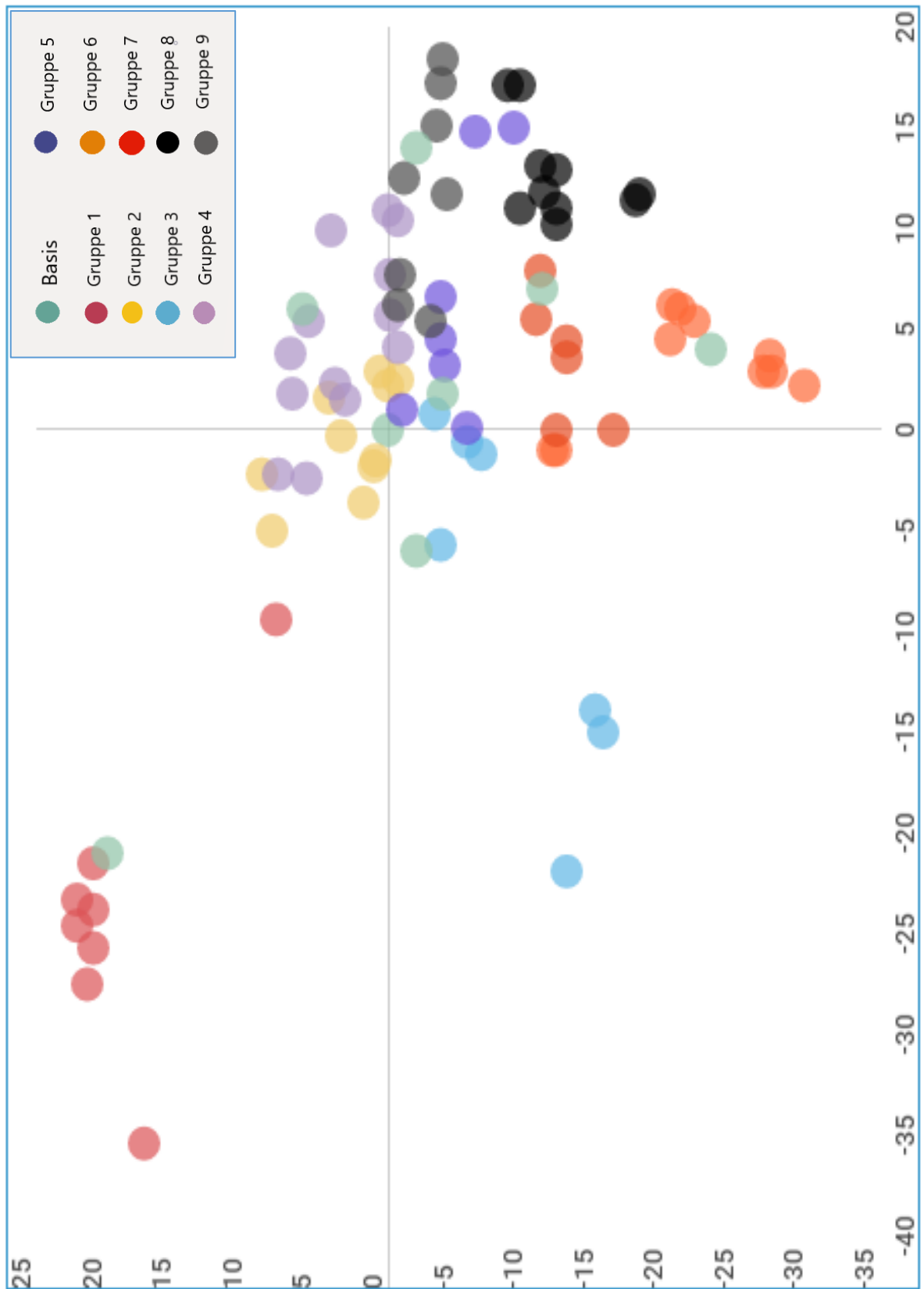


Abbildung 9: Verteilung der Knoten

6.2. Ergebnisse

Alle Berechnungen werden auf einem Intel Core i5 CPU Prozessor mit 2.53 GHz mit einem Windows Betriebssystem durchgeführt. Der Xpress Optimizer benötigt für die Berechnung jeder Route höchstens 0,2 Sekunden. Durch die Cutting-Plane-Methode ist bei fast keiner Berechnung ein Branch-and-Bound-Baum notwendig. Nur in zwei Fällen wird der Baum verzweigt: Bei Gruppe 3 mit der unteren Schranke von ≥ 70 wird das optimale Ergebnis bei Knoten 4 des Entscheidungsbaumes gefunden und bei Gruppe 6 mit der unteren Schranke von ≥ 73 wird das Ergebnis bei Knoten 8 des Entscheidungsbaumes gefunden.

Alle Ergebnisse werden in Tabelle 2 dargestellt. Diese umfasst alle mit Xpress berechneten Routen: Sowohl die Routen mit der minimierten Gesamtlänge als auch jene die mit Hilfe der unteren Schranken künstlich verlängerten Routen und jene, deren Gruppe noch einmal zur Schule geführt wird.

Gruppe	Minimum	≥ 60	≥ 65	≥ 70	73	zurück zur Schule Minimum	zurück zur Schule ≥ 60	zurück zur Schule ≥ 65	zurück zur Schule ≥ 70
1	73	-	-	-	-	-	-	-	-
2	36	60	65	70	73	58	72	69	72
3	54	60	65	70	73	67	72	72	71
4	67	-	-	70	73	-	-	-	nicht möglich
5	37	60	65	70	73	61	72	73	72
6	61	-	65	70	73	-	-	72	nicht möglich
7	49	60	65	70	73	57	67	73	nicht möglich
8	61	-	65	70	73	nicht möglich	nicht möglich	73	nicht möglich
9	41	60	65	70	73	61	70	72	nicht möglich
größte Abweichung	37	13	8	3	0	16	6	4	2

Tabelle 2: Tourenvergleich

Alle Routen werden auf ihre Sicherheit und Sinnhaftigkeit überprüft. Die in der Tabelle grün markierten Touren sind zur weiteren Bearbeitung ausgewählt. Um die Länge der Touren einander anzugleichen, wird wie in Kapitel 5.1 beschrieben vorgegangen: Es werden Knoten vertauscht, zusätzliche Pausen eingefügt oder die Gruppe noch einmal zurück zur Schule geführt. Alle Touren sollten eine Länge zwischen 60 und 74 Minuten erlangen. In Tabelle 3 findet sich eine Übersicht der fertiggestellten Touren. Knoten 1 lokalisiert die Schule und Knoten 45 die Bushaltestelle.

Gruppe	Länge in Minuten	Tour
1	74	1-72-70-69-67-68-88-73-71-82-2-1
2	66	1-4-3-12-10-5-11-9-1-8-7-6-1-45-83-1
3	71	1-17-83-19-16-15-1-13-14-18-45-1
4	70	1-45-21-25-24-20-30-26-84-31-89-29-22-27-28-23-32-1
5	63	1-39-34-36-38-35-1-85-37-33-1-45-1
6	62	1-45-40-41-78-79-80-77-87-76-75-74-81-45-1
7	61	1-45-1-47-44-43-42-49-86-46-48-45-1
8	69	1-85-57-56-52-54-55-51-50-58-53-86-1-45-1
9	62	1-45-63-64-65-1-85-59-60-66-62-61-1
größte Abweichung:	13	

Tabelle 3: Fertige Touren

Im Folgenden werden einige Touren vorgestellt und vorgenommene Veränderungen sowie die Gründe hierfür dargelegt. Alle Touren und Bäume finden sich im Anhang wieder, ebenso die Touren der Gruppenleiter*innen.

6.2.1. Berechnete Touren

Die berechnete Route der Gruppe 1 ist unzulässig, da zuerst zum letzten Haus in der Straße gegangen und somit an zwei Häuser vorbeigegangen wird. Aus diesem Grund wird die Reihenfolge dieser Knoten getauscht und die Route somit zulässig. Die Dauer verlängert sich dadurch um eine Minute. Die korrigierte Tour der Gruppe 1 wird in Abbildung 10 dargestellt. Stelle 0/0 markiert die Schule und an den Knoten 82 und 89 finden sich die eingeplanten Pausen. Die Gesamtdauer beträgt nun 74 Minuten.

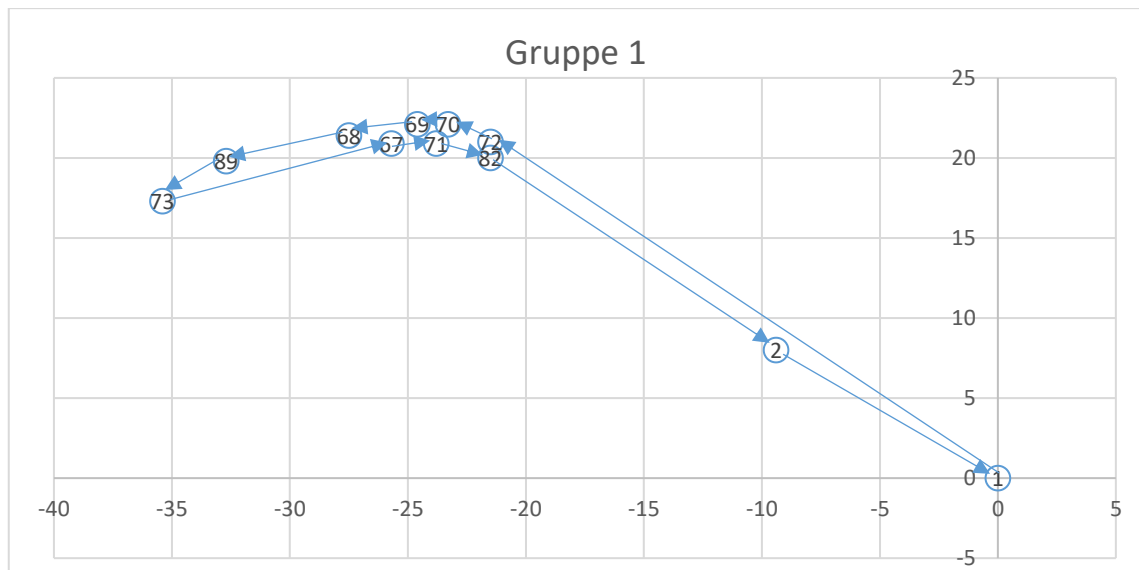


Abbildung 10: berechnete Tour der Gruppe 1

Die Tour der Gruppe 3 wird in Subtouren aufgeteilt und wieder zur Schule zurückgeführt. Dadurch liegt die Strecke näher am Schulweg der Kinder und die Zeit, welche die Gruppe benötigt, um die Strecke zurückzulegen, wird verlängert. Ebenso müssen zwei Knoten getauscht werden, um die Zulässigkeit der Route zu gewährleisten. Die Tour wird von 65 Minuten auf 71 verlängert. Knoten 83 markiert die Pause und Knoten 45 die Bushaltestelle.

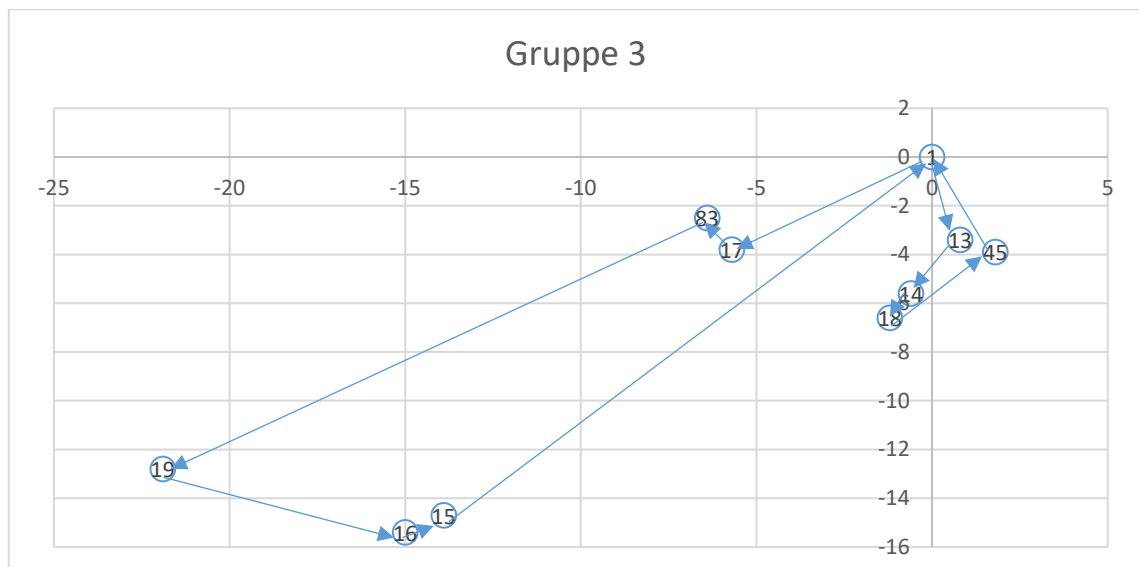


Abbildung 11: berechnete Tour der Gruppe 3

Zusätzliche Pausen werden nur in zwei Fällen hinzugefügt; bei Gruppe 2 und Gruppe 5. Diese beiden Gruppen halten wie geplant eine Pause bei einem*r Schüler*in zu Hause

und zusätzlich eine Pause bei einem Spielplatz ab. Des Weiteren werden beide Gruppen noch einmal zur Schule zurückgeführt. Diese beiden Gruppen haben Touren mit der geringsten Dauer, durch die Verlängerungsmaßnahmen können die Touren auf fast das Doppelte verlängert werden.

Bei einigen Gruppen wird unter anderem eingeführt, dass von der Schule zur Bushaltestelle gegangen wird und dann wieder zurück. Erst danach wird zu den Wohnhäusern der Kinder gegangen. Dadurch wird der Weg zur Bushaltestelle extra geübt und die Verkehrssituation und das richtige Verhalten im Straßenverkehr kann explizit erklärt werden. Gruppe 8 ist ein Beispiel hierfür. Denn dieser Gruppe sind besonders viele Kinder zugeteilt, welche mit dem Bus zur Schule kommen. Ebenso liegt eine Bushaltestelle, an der manche Kinder am Nachhauseweg wieder aussteigen, auch auf der Strecke. So kann nicht nur der Weg von der Bushaltestelle zur Schule und retour geübt werden, sondern auch jener von der Bushaltestelle zum Wohnhaus der Kinder. Dies ist bei den Gruppen 1, 3, 6, 7 und 8 der Fall.

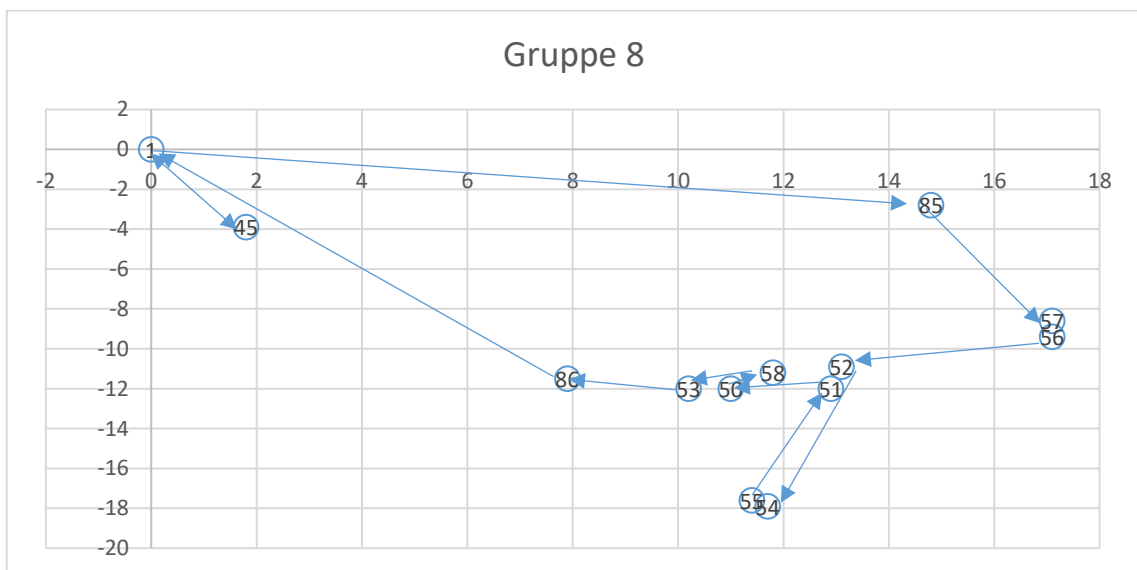


Abbildung 12: berechnete Tour der Gruppe 8

6.2.2. Bäume

Unabhängig von der Erstellung der Rundreisen werden in allen Gruppen die Knoten zu Bäumen zusammengefasst. Ein Baum stellt den Schulweg der Kinder von der Schule ausgehend dar. An den Blättern befinden sich die Wohnhäuser der Kinder. Hier werden weder die Pausen noch die Bushaltestelle in die Bäume integriert. Darüber hinaus wird

auch nicht versucht die Länge der Bäume einander anzugleichen. Es ist lediglich wichtig, dass der Baum den tatsächlichen Schulweg eines Kindes darstellt. Bei einigen Gruppen ergibt sich deshalb ein Wald, welcher aus mehreren Bäumen besteht. In Tabelle 4 wird eine Übersicht der Bäume gegeben.

Gruppe	Bäume	Gesamtlänge
1	1	54
2	3	32
3	2	43
4	3	56
5	2	24
6	2	45
7	2	44
8	1	35
9	1	25
Bushaltestelle	1	10

Tabelle 4: Vergleich der Bäume

An dieser Stelle sollen jene Gruppen, deren Rundreisen zuvor gezeigt wurden, präsentiert werden, um die Zuteilung der Knoten zu Bäumen zu veranschaulichen und die Touren mit den Schulwegen der Kinder zu vergleichen.

Wie in der Abbildung 13 zu erkennen ist, sind die Unterschiede zwischen dem Baumdiagramm und der Rundreise der Gruppe 1 gering. Nur ein Weg führt von der Schule weg zu den Häusern der Kinder. Der Baum verzweigt sich recht spät und die meisten Häuser liegen an einem Ast.

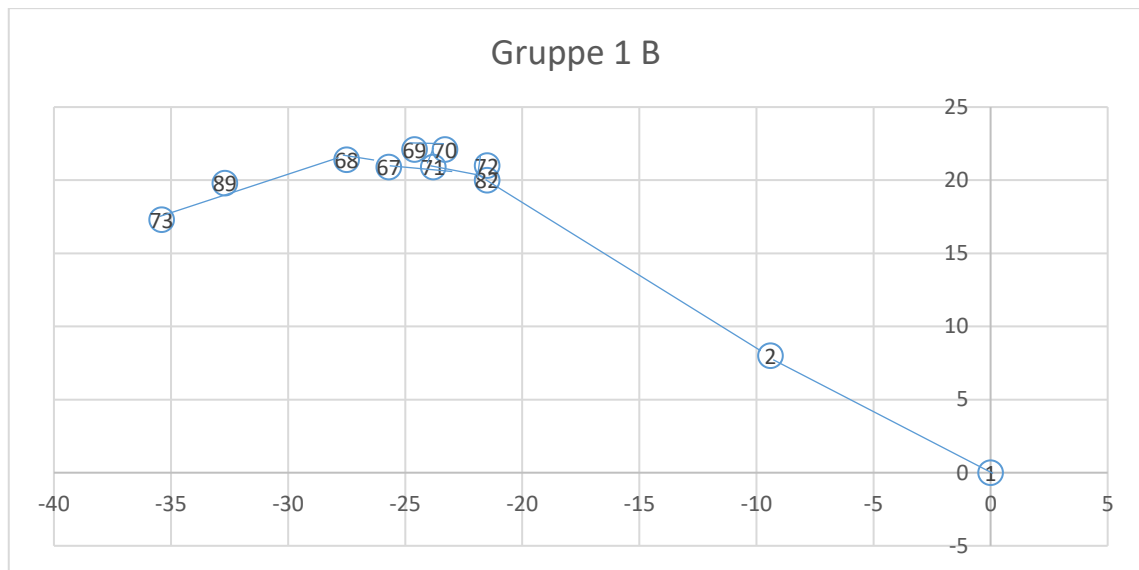


Abbildung 13: Baum der Gruppe 1

Vergleicht man Abbildung 14 mit Abbildung 11, so kann erkannt werden, dass es von Vorteil ist, bei der Rundreise die Gruppe 3 zwischendurch nochmal zur Schule zurück zu führen und zwei voneinander getrennte Touren zu erstellen. Jeder der beiden Bäume enthält dieselben Knoten, welche auch in den beiden Subtours enthalten sind. Auf diese Weise verläuft der Weg näher am Schulweg der Kinder.

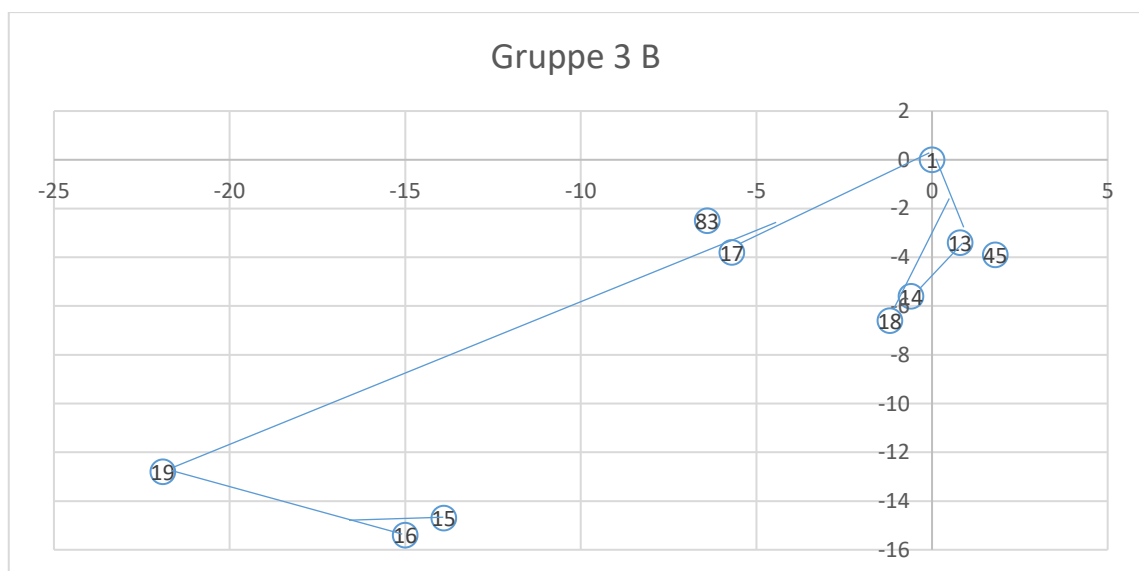


Abbildung 14: Wald der Gruppe 3

Vergleicht man den Baum der Gruppe 8 mit deren Rundreise, so lässt sich erkennen, dass die Rundreise nicht dem Schulweg aller Kinder entspricht. Den Anfang des Weges haben alle Schulwege gleich, doch danach verzweigt sich der Baum in verschiedene

Richtungen. Da aber der Weg zu lange wäre, kann die Rundreise nicht in zwei Touren aufgespalten werden. Ein Zurückgehen zur Schule ist somit nicht möglich.

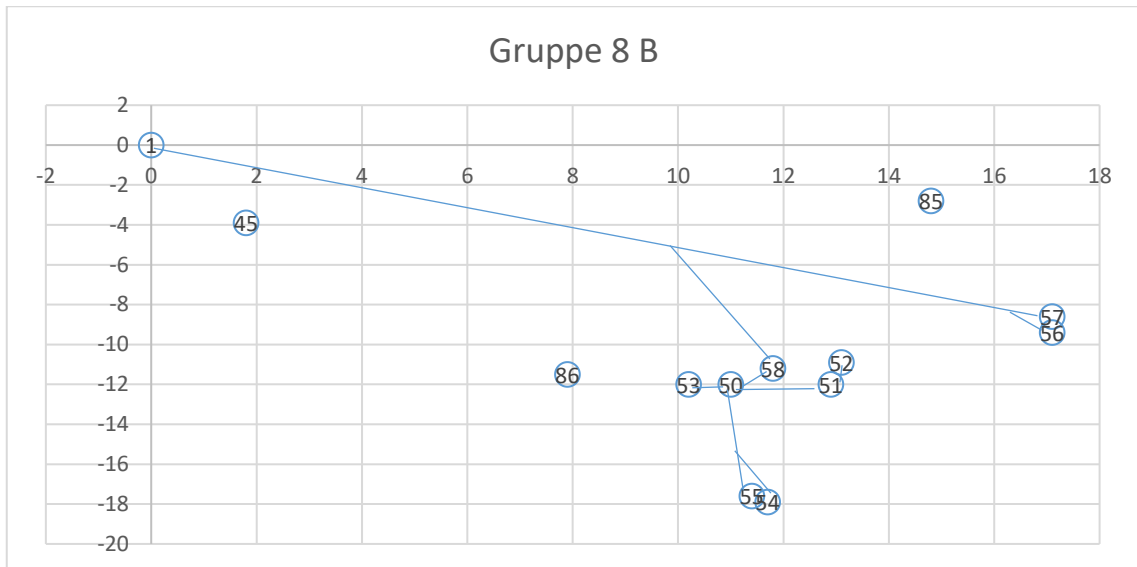


Abbildung 15: Baum der Gruppe 8

Im folgenden Kapitel werden die Touren mit den tatsächlichen Schulwegen der Kinder verglichen. Des Weiteren folgt die Meinung der Schulleiterin zu den berechneten Touren. Ebenso wird erörtert, welche Methoden noch angewandt werden könnten, um die Touren dem Schulweg der Kinder anzugleichen.

6.3. Zusammenfassung und Vergleich

Alle Touren werden mit den Schulwegen der Kinder verglichen. Es wird erörtert ob die Kinder ihren ganzen Schulweg abgehen (in der Tabelle mit „ja“ gekennzeichnet), diesen nur teilweise bestreiten (in der Tabelle mit „teilweise“ gekennzeichnet) oder ob die Tour gar nichts mit ihrem tatsächlichen Schulweg gemein hat (in der Tabelle mit „nein“ gekennzeichnet). In Tabelle 5 findet sich eine Übersicht über diese Ergebnisse. Wie sich erkennen lässt, gehen bei den berechneten Touren um 11,25% mehr Schüler*innen ihren Schulweg als bei jenen von den Gruppenleiter*innen zusammengestellten Touren. Bei den berechneten Touren gehen 31 Schüler*innen teilweise ihren Schulweg und bei den Touren der Gruppenleiter*innen 29 Kinder. Hier ist der Unterschied mit 2,5% minimal. Bei den berechneten Touren gehen 10 Schüler*innen einen Weg, welcher nichts mit ihrem Schulweg gemein hat. Bei den von den Gruppenleiter*innen erstellten Touren betrifft dies die doppelte Anzahl an Schüler*innen.

	Touren der Gruppenlei- ter*innen		Berechnete Touren		Verbesserung
	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	
ja	30	37,5%	39	48,75%	+11,25%
teilweise	29	36,25%	31	38,75%	+2,5%
nein	21	26,25%	10	12,5%	-13,75%
gesamt	80	100%	80	100%	

Tabelle 5: Vergleich der Touren mit Schulwegen

Die Längen der Touren können allerdings nicht mit den Längen der Touren der Gruppenleiter*innen verglichen werden. Der Grund hierfür ist, dass im Zuge dieser Arbeit die Entfernungen und die benötigte Zeit, um von einem Knoten zum nächsten zu gelangen, mithilfe von Google Maps berechnet wurde. Es wird angenommen, dass für die längste Tour vier Schulstunden benötigt werden, da Kinder langsamer gehen als Erwachsene und auch mehrere Pausen gemacht werden. Die Gruppenleiter*innen berechnen die Länge ihrer Touren jedoch nicht im Voraus. Sie planen ihre Routen so, dass sie ungefähr vier Schulstunden dafür benötigen. Aus diesem Grund kann auf der Zeitebene kein Vergleich ohne praktische Durchführung gemacht werden.

Im folgenden Kapitel sollen die Touren der Gruppe 2 miteinander verglichen werden, um die Unterschiede aufzuzeigen.

6.3.1. Gruppe 2

Werden nun die berechneten Touren mit den Touren der Gruppenleiter*innen und den tatsächlichen Schulwegen der Kinder verglichen, so fallen einige Unterschiede auf. Beispielhaft hierfür wird Gruppe 2 näher betrachtet.

Die berechnete Route (Abbildung 16) wird in drei Subtouren unterteilt. Somit ist der Weg näher am tatsächlichen Schulweg der Kinder. Außerdem trägt dies zur Verlängerung der Strecke bei. Im Vergleich mit dem Wald der Gruppe (Abbildung 18), lässt sich erkennen, dass in diesem Fall alle Kinder ihren Schulweg gehen. Die Tour, welche

von der Gruppenleitung zusammengestellt wurde (Abbildung 17), sieht ganz anders aus als die berechnete Tour. Bei der Tour der Gruppenleitung wird Kreuz und Quer gegangen. Dies soll dem Zweck dienen, die Strecke zu verlängern und die benötigte Zeit, um den Weg zurückzulegen, zu erhöhen. Um dies zu erreichen, wird bei der berechneten Tour eine zusätzliche Pause eingefügt, welche etwas von den Wohnhäusern der Kinder entfernt liegt. Wird die Tour der Gruppenleitung genauer betrachtet, so lässt sich im Vergleich mit dem Schulweg erkennen, dass nur wenige Kinder tatsächlich ihren Schulweg gehen. Einige gehen ihn teilweise. Die Strecke hat jedoch wenig mit dem Schulweg der meisten Kinder gemein. Es wird zwar zu allen Häusern gegangen, aber nicht der reale Weg zur Schule. In Hinblick auf die Nähe zum tatsächlichen Schulweg der Kinder stellt die berechnete Tour eine Verbesserung gegenüber der Tour der Gruppenleitung dar.

Abbildung 16: berechnete Tour der Gruppe 2

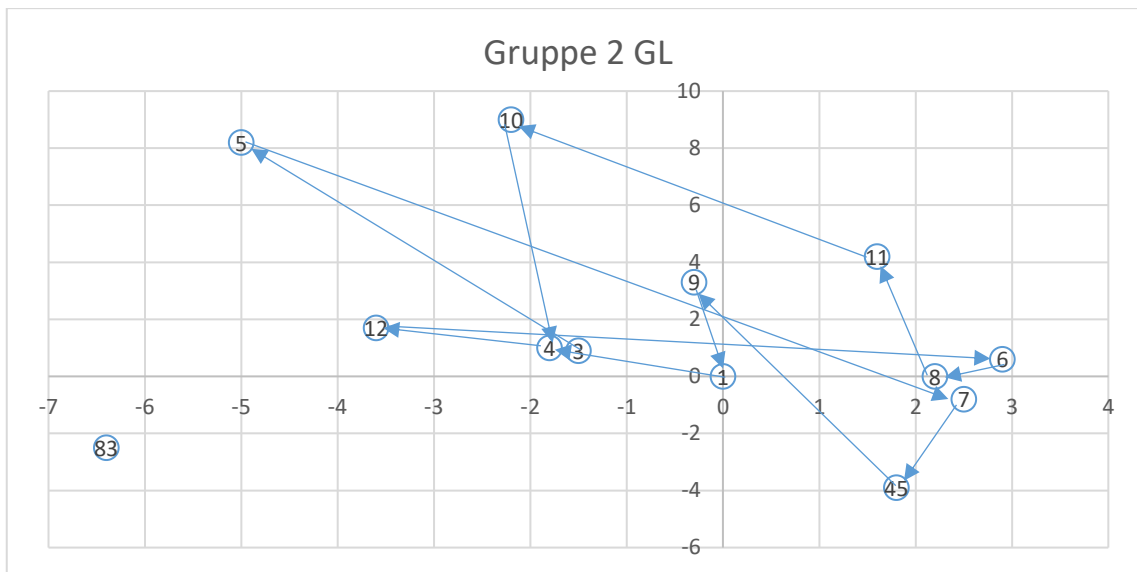


Abbildung 17: Tour der Gruppe 2 der Gruppenleiter

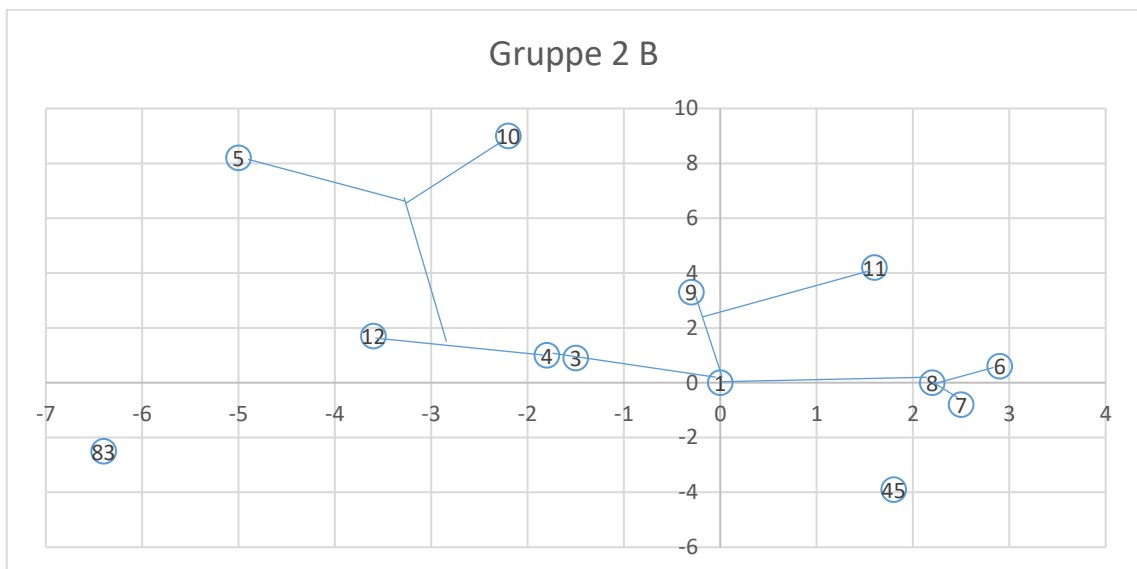


Abbildung 18: Wald der Gruppe 2

6.3.2. Kritik

Obwohl die berechneten Touren in Summe näher am Schulweg der Kinder liegen, gibt es dennoch einige Punkte, welche verbessert werden könnten:

- Mit 13 Minuten ist die Differenz zwischen den Gesamtlängen der Touren nicht gering. Diese kann jedoch mit unterschiedlich langen Pausen ausgeglichen werden.

- Der Aufwand diese Touren zu erstellen ist relativ groß und arbeitsintensiv. Damit die Gruppenleiter*innen die Routen mit dem Xpress Optimizer berechnen können, müssen sie zuerst in der Anwendung dieses Programms geschult werden. Obwohl das Modell im Grunde für alle Gruppen gleich ist, müssen dennoch jedes Jahr für jede Gruppe neue Entfernungsmatrizen erstellt werden. Dies nimmt viel Zeit in Anspruch. Außerdem müssen die berechneten Routen nachbearbeitet werden, um den Anforderungen des Aktionstages zu entsprechen. Es ist jedoch immer ein*e Gruppenleiter*in für die Tour einer Gruppe zuständig. Der Arbeitsaufwand ist demnach nicht so groß, als wenn eine Person für alle 9 Gruppen die Touren erstellt und berechnet.
- Des Weiteren müsste das Programm erworben werden, um es nützen zu können. Dies ist mit einem finanziellen Aufwand seitens der Schulgemeinde verbunden.
- Die Bäume könnten bei der Zusammenstellung der Gruppen helfen. Um jedoch die gesamte Einteilung zu optimieren, müsste auf die sozialen Faktoren verzichtet werden. Es könnte nicht darauf Rücksicht genommen werden, dass jedes Kind gemeinsam mit einem*r Freund*in den Aktionstag absolviert, sondern es würde nur der Tourenlänge und optimaler Nähe zum tatsächlichen Schulweg oberste Priorität gegeben werden.

6.3.3. Besprechung mit der Schulleiterin

Die berechneten Touren werden mit der Schulleiterin besprochen, welche sich zuvor mit den Gruppenleiter*innen ausgetauscht hatte. Sie wies ausdrücklich darauf hin, dass sowohl sie, als auch die Gruppenleiter*innen, die Berechnung der Touren als eine sehr gute Idee erachten und sie mit Freude entgegennehmen (vgl. Schulleiterin 2020:Z123–131). Einige Punkte seien jedoch sehr wichtig bei der Gruppenplanung und unbedingt mit einzuberechnen. Unter anderem sei die Planung der Pausen essenziell für eine gute Durchführung des Aktionstages. Diese sollten, wenn möglich auf Spielplätzen abgehalten werden. Noch besser wäre es, wenn sich eine Toilettenanlage in der Nähe befände. Bei Gruppe 1 ist die Einplanung der Pausen sehr gut gelungen. Jeweils nach einer längeren Strecke ist eine Pause angesetzt und bei beiden Aufenthalten gibt es die Möglichkeit eine Toilette zu benutzen (vgl. Schulleiterin 2020:Z28ff.). Dies ist jedoch bei Gruppe 6 nicht gut geplant. Hier wird nicht beachtet, dass nach einer langen Strecke eine Pause eingelegt werden sollte. Ebenso könnte noch eine zweite Pause eingeplant werden, um den Rückweg entspannter zu gestalten (vgl. Schulleiterin 2020:Z92–100). Bei Gruppe 8 wird die

Pause etwas zu früh eingeplant. Es wäre besser, vorher noch zu einigen Häusern zu gehen und danach erst eine Pause einzulegen (vgl. Schulleiterin 2020: Z108–111). Bei Gruppe 7 könnte man die Pause vorziehen und noch eine zweite Pause anzudenken, aber die Schulleiterin ist der Meinung, dass die Planung der Strecke gut gelungen ist und diese Maßnahme nicht unbedingt notwendig ist (vgl. Schulleiterin 2020:Z103ff.).

Oberste Priorität wird der Sicherheit der Kinder am Schulweg gegeben, um die Kinder nicht in Gefahr zu bringen und ihnen den sichersten Weg zu zeigen. Dies ist bei fast allen Gruppen erreicht worden, so die Meinung der Schulleiterin. Nur die Route der Gruppe 1 wäre in dieser Hinsicht verbesserungswürdig. Hier sieht die Planung vor, dass eine Straße genau zwischen zwei Kurven überquert werden sollte. Die Schulleiterin ist der Meinung, dass es besser sei, ein Stück an dieser Straße entlang zu gehen und sie erst an einer anderen Stelle zu queren (vgl. Schulleiterin 2020:Z17–20). Hier gibt es an keiner der beiden Stellen einen Zebrastreifen, aber auch keinen Gehsteig. Auch wohnen einige Kinder an einer Landstraße, welche zwei Täler mit einander verbindet, diese ist recht schmal und hat ein hohes Verkehrsaufkommen. Des Weiteren gibt es keinen Gehsteig und die Autos fahren an diesem Straßenabschnitt relativ schnell. Die Schulleiterin überlegt jedes Jahr, ob man zu den Wohnhäusern dieser Kinder gehen sollte, oder ob es nicht besser wäre, diese auszulassen. Jedoch ist es sehr wichtig den Kindern die Gefahrenquellen und das richtige Verhalten näher zu bringen (vgl. Schulleiterin 2020:Z24–28).

Die vorliegende Arbeit hat sich die Verbesserung der Touren des Aktionstages zum Ziel gesetzt; hinsichtlich der Nähe der Touren zum tatsächlichen Schulweg der Kinder ist eine Optimierung gelungen. Wie zuvor beschrieben ist bei den berechneten Touren die Anzahl der Kinder höher, welche im Zuge des Aktionstages tatsächlich ihren Schulweg gehen, sei es von der Schule nach Hause, oder von Zuhause zur Schule. Bei Gruppe 1 ist dennoch ein Fehler unterlaufen, welchen die Schulleiterin erst später entdeckte: es wird an einem Wohnhaus vorbeigegangen und erst später dorthin zurückgekehrt. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, sollte nicht an den Häusern der Kinder vorbeigegangen werden, da dies die Schüler*innen verwirren würde (vgl. Schulleiterin 2020:Z12f.). Demnach muss bei Gruppe 1 eine kleine Veränderung vorgenommen werden, um diesen Fehler zu korrigieren. Bei Gruppe 9 wäre anzumerken, dass es besser ist, zuerst alle Wohnhäuser der Kinder aufzusuchen und erst ganz zum Schluss die Bushaltestelle. Damit könnte man besser einschätzen wie viel Zeit noch zur Verfügung steht und wie lange ungefähr gebraucht wird um rechtzeitig am Ende des Aktionstages wieder bei der Schule zu sein (vgl.

Schulleiterin 2020:Z119ff.). Generell meint die Schulleiterin, dass es am besten wäre, immer die längste direkte Strecke für den Schluss aufzuheben. Die Gruppenleitung wisse, wie lange man für diesen Weg braucht und könne sich demnach die Zeit besser einteilen. Des Weiteren lässt die Konzentration der Kinder gegen Ende des Aktionstages nach und es ist besser, hier eine Strecke zu wählen, welche an verkehrsberuhigten und wenig befahrenen Straßen oder einem Spazierweg entlangführt. Da sie selbst die Gruppenleiterin der Gruppe 1 ist, wähle sie für den Rückweg einen Waldweg. Hier können die Kinder freier gehen, sodass die Gruppe etwas schneller ist, als wenn sie auf der Straße gehen müsste. Außerdem weiß die Leiterin genau, wie lange sie für dieses Stück benötigt und kann die Dauer der Strecke gut abschätzen (vgl. Schulleiterin 2020:Z15ff. u. Z50–54).

Ebenso findet die Schulleiterin es wichtig, dass die Kinder, welche mit dem Bus fahren und ihr Haus trotzdem zu Fuß erreichbar ist, auch ihren Weg von der Bushaltestelle nach Hause besprechen und abgehen. Bei den meisten Touren liegen die Bushaltestellen auch auf der Strecke. In Kapitel 6.2 wurde erwähnt, bei welchen Gruppen dies möglich ist.

Es wäre möglich im Zuge eines anderen Projektes auch zu den Häusern der Kinder zu gehen, zu denen beim Aktionstag „Sicherer Schulweg“ nicht gegangen wird. Dieses Projekt müsste aber anders organisiert werden, da mit dem Bus in die jeweilige Ortschaft erst gefahren werden müsste. Es ist jedoch ein Anliegen der Schulleiterin, allen Kindern ihren sicheren Schulweg näher zu bringen (vgl. Schulleiterin 2020:Z28–31). Allerdings liegt die Verantwortung für den Schulweg nicht bei der Schule. Wie in Kapitel 2 beschrieben beginnt die gesetzliche Aufsichtspflicht beim Betreten der Schulliegenschaften, davor obliegt diese den Eltern.

Zusammengefasst ist die Rückmeldung sowohl von Seiten der Schulleiterin als auch von den Gruppenleiter*innen für die berechneten Touren sehr gut. Es gibt geringfügige Verbesserungsmöglichkeiten. Beispielsweise könnte mit einer verbesserten Gruppeneinteilung auch die Tourenplanung optimiert werden, dafür müsste aber auf die soziale Komponente verzichtet werden. Die Schulleiterin und die Gruppenleiter*innen nehmen die Vorschläge gerne entgegen.

Im folgenden Kapitel wird die vorliegende Arbeit zusammengefasst und ein Fazit formuliert.

7. Fazit

Ziel des Aktionstages „Sicherer Schulweg“ ist es, den Kindern der Grundschule den sichersten Schulweg zu zeigen und ihnen das richtige Verhalten im Straßenverkehr beizubringen. Die Kinder werden je nach Wohnort in Gruppen eingeteilt. Am Tag des Projektes gehen die Gruppen von der Schule zu den Häusern der Kinder und kehren danach wieder zur Schule zurück. Dies entspricht einem Traveling Salesman Problem, welches eine möglichst kurze Route zwischen den verschiedenen Standorten der Kund*innen und des Depots finden soll. Der Aktionstag „Sicherer Schulweg“ unterscheidet sich jedoch von einem klassischen Problem, da nicht der kürzeste sondern der sicherste Weg gefunden werden soll. Ebenso soll die Strecke so nahe wie möglich am Schulweg der Kinder liegen und alle Gruppen ungefähr gleich lange brauchen, um den Weg zu bewältigen.

Die Berechnung der Routen mithilfe des Branch-and-Bound-Verfahrens und der Cutting-Plane-Methode und die anschließende Bearbeitung dieser Touren bringt eine Verbesserung im Vergleich zu jenen der Gruppenleiter*innen.

Die anfangs gestellten Fragen können nun beantwortet werden.

Welche Methoden gibt es, um diesen drei Anforderungen gerecht zu werden?

Mithilfe des Xpress Optimizers und den darin implizierten Berechnungsmethoden (Branch-and-Bound und Cutting-Plane) können gute Ausgangslösungen erstellt werden. Um die Touren an die Anforderungen des Aktionstages anzupassen, ist es unerlässlich, dass eine Bearbeitung der berechneten Routen erfolgt. Durch das Zurückführen der Gruppe zur Schule ergibt sich eine Unterteilung in Subtouren, daher nähern sich die Touren dem Schulweg der Kinder an. Ebenso führt die Einfügung von zusätzlichen Pausen zur Anpassung der Streckenlängen und infolge auch zur Optimierung der Länge der einzelnen Touren. Um den sichersten Weg zu wählen, wurden bereits bei der Erstellung der Entfernungsmatrizen, so weit wie möglich, nur sichere Wege ausgewählt. Andererseits ist eine Nachbearbeitung, basierend auf optischen Beobachtungen, unerlässlich. Diese Methode ist aufwändiger, liefert aber bessere Ergebnisse als die Zusammenstellung der Touren durch die Gruppenleiter*innen.

*Inwiefern können die Touren der Gruppenleiter*innen verbessert werden?*

Die Touren der Gruppenleiter*innen können dahingehend verbessert werden, indem die berechneten Strecken näher am tatsächlichen Schulweg der Kinder liegen. Ob eine Verminderung des Aufwands beim Erstellen der Touren stattfindet, hängt von den individuellen Strategien der Gruppenleiter*innen ab. Da die meisten von ihnen umfangreiche Überlegungen und Planungen für den Ablauf des Aktionstages betreiben, kann hier ebenfalls eine Reduzierung des Arbeitsaufwandes erkennbar sein.

Um jedoch eine optimale Lösung zu erzielen, müssten die Gruppen neu eingeteilt werden. Die sozialen Faktoren, auf welche die Schulleiterin bei der Einteilung Rücksicht nimmt, müssten für diesen Zweck außer Acht gelassen werden. Die Bäume, welche die Schulwege der Kinder repräsentieren, könnten für eine Neueinteilung verwendet werden. Dadurch würde es gelingen, die Strecke so nah wie möglich an die Schulwege der Kinder anzupassen. Ebenso würde dies essentiell dazu beitragen, dass die Längen der Touren aller Gruppen sich einander angleichen.

Würde die Arbeit noch einmal verfasst werden, so würde ich versuchen die Gruppen anders einzuteilen. Nur dadurch könnten optimale Ergebnisse erzielt werden. Es müsste versucht werden, die sozialen Faktoren in die Berechnung miteinfließen zu lassen. Ebenso könnten die Touren mit anderen Programmen berechnet oder der Algorithmus verändert werden. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit, die Zielfunktion zu verändern, um nicht die Distanzen zu minimieren, sondern um beispielsweise die Länge der Touren einander anzugleichen. Die effektivste Methode, um ein optimales Ergebnis zu erzielen, ist eine Neueinteilung der Gruppen.

Die Erstellung der Baumdiagramme der Schulwege der Kinder kann auch als Ausgangspunkt für ein weiteres Projekt genutzt werden. Mit Hilfe dieser kann ein Netzwerk an Schulwegen erstellt werden, mit bestimmten Knotenpunkten, an welchen sich die Kinder treffen könnten, um den restlichen Schulweg gemeinsam zu gehen. Dies hätte den Vorteil, dass die soziale Komponente die Schüler*innen zum Zufußgehen animiert. Eine Gruppe an Kindern kann durch Spiele vom Weg abgelenkt werden, jedoch können sich die Kinder auch gegenseitig auf Gefahren hinweisen. Um den Schulweg sicherer zu gestalten, können freiwillige Schülerlots*innen eingesetzt werden, welche mit den Kindern gemeinsam von den Treffpunkten zur Schule gehen. Die vorliegende Masterarbeit trägt dazu bei, die Umsetzung dieses Projektes anzudenken.

Bibliographie

Applegate, David L. & Bixby, Robert E. & Chvátal, Vašek & Cook, William J. 2006. *The Traveling Salesman Problem*. Princeton: Princeton University Press.

Balas, Egon & Christofides, Nicos. 1981. A restricted Lagrangean approach to the traveling salesman problem. *Mathematical Programming* 21, 19–46.

Bundesministerium Bildung, Wissenschaft und Forschung. 1997. Aufsichtserlaß – Neufassung: Aufsichtspflicht - Aufsichtsführung durch Lehrer sowie durch andere Aufsichtspersonen im Sinne des § 44a SchUG. In: https://www.bmbwf.gv.at/The-men/schule/schulrecht/rs/1997-2017/1997_46.html, Stand: 15/01/2020.

Dantzig, George B. & Fulkerson, Delbert R. & Johnson, Selmer M.. 1954. Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *Operations Research* 2, 393–410.

Domschke, Wolfgang & Scholl, Armin. 2010⁵. *Logistik: Rundreisen und Touren*. München: Oldenburg.

Ghiani, Gianpaolo & Laporte, Gilbert & Musmanno, Roberto. 2013². *Introduction to Logistics Systems Management*. Chichester: John Wiley & Sons.

Grötschel, Martin & Padberg, Manfred. 1999. Die optimierte Odyssee. *Spektrum der Wissenschaft, Digest* 2, 23–41.

FICO. 2019a. FICO Xpress Optimization. In: <https://www.fico.com/de/products/fico-xpress-optimization>, Stand: 23/10/2019.

FICO. 2019b. Xpress Product Suit. In: https://www.fico.com/fico-xpress-optimization/docs/latest/getting_started/dhtml/chap1_sec_c1s2.html, Stand: 23/10/2019.

FICO Xpress Optimization. 2019. *Reference Manual: FICO Xpress Optimizer*, Fair Isaac Corporation.

Lehrerin 1 und 2. 2019. *Aktionstag „Sicherer Schulweg“*. Interview mit Lehrerin 1 und 2. Niederösterreich, am 26.09.2019, durchgeführt von Anna-Maria Spiwak.

Lehrerin 3. 2019. *Aktionstag „Sicherer Schulweg“*. Interview mit Lehrerin 3. Niederösterreich, am 27.09.2019, durchgeführt von Anna-Maria Spiwak.

Lehrerin 4 und 5. 2019. *Aktionstag „Sicherer Schulweg“*. Interview mit Lehrerin 4 und 5. Niederösterreich, am 30.09.2019, durchgeführt von Anna-Maria Spiwak.

Lehrerin 6. 2019. *Aktionstag „Sicherer Schulweg“*. Interview mit Lehrerin 6. Niederösterreich, am 30.09.2019, durchgeführt von Anna-Maria Spiwak.

Lehrerin 7. 2019. *Aktionstag „Sicherer Schulweg“*. Interview mit Lehrerin 7. Niederösterreich, am 30.09.2019, durchgeführt von Anna-Maria Spiwak.

Lehrerin 8. 2019. *Aktionstag „Sicherer Schulweg“*. Interview mit Lehrerin 8. Niederösterreich, am 30.09.2019, durchgeführt von Anna-Maria Spiwak.

Lehrer 9. 2019. *Aktionstag „Sicherer Schulweg“*. Interview mit Lehrer 9. Niederösterreich, am 04.10.2019, durchgeführt von Anna-Maria Spiwak.

Matl, Piotr & Hartl, Richard F. & Vidal, Thibaut. 2018a. Workload Equity in Vehicle Routing Problems: A Survey and Analysis. *Transportation Science* 52:2, 239–260.

Matl, Piotr & Hartl, Richard F. & Vidal, Thibaut. 2018b. Workload Equity in Vehicle Routing: The Impact of Alternative Workload Resources. Working Paper 1/2018, Universität Wien.

Mattfeld, Dirk & Vahrenkamp, Richard. 2014². *Logistiknetzwerke: Modelle für Standortwahl und Tourenplanung*. Wiesbaden: Springer.

Modeling with Xpress. In: <https://www.maths.ed.ac.uk/hall/Xpress/XpressDocumentation.html>, Stand: 06/11/2019.

Monnot, Jérôme & Toulouse, Sophie. 2010. The Traveling Salesman Problem and its Variations. In: Vangelis Th. Paschos (Hg.) *Paradigms of Combinatorial Optimization: Problems and New Approaches*. London: John Wiley & Sons, Hoboken & ISTE, 173–214.

Schulleiterin. 2019. *Aktionstag „Sicherer Schulweg“*. Interview I mit der Leiterin der Volksschule. Niederösterreich, am 15.10.2019, durchgeführt von Anna-Maria Spiwak.

Schulleiterin. 2020. *Aktionstag „Sicherer Schulweg“, Besprechung der Touren*. Interview II mit der Leiterin der Volksschule. Niederösterreich, am 09.01.2020, durchgeführt von Anna-Maria Spiwak.

Suhl, Leena & Mellouli, Taïeb. 2009². *Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*. Berlin: Springer.

Vahrenkamp, Richard. 2003. *Quantitative Logistik für das Supply-Chain-Management*. München: Oldenburg.

Wenger, Wolf. 2010. *Multikriterielle Tourenplanung*, Wiesbaden: Gabler.

Abstract

Die persönliche Motivation für diese Masterarbeit war die Überzeugung, dass das richtige Verhalten im Straßenverkehr bereits für Kinder sehr wichtig ist. Das Projekt Aktionstag „Sicherer Schulweg“ dient dem Kennenlernen des sichersten Schulweges und des richtigen Verhaltens im Straßenverkehr. Bei diesem Aktionstag werden Volksschulkinder in Gruppen aufgeteilt. Diese Gruppen gehen von der Schule zu den Wohnhäusern der Kinder und wieder zurück zur Schule. Die Tourenplanung wird hierbei von den Lehrkräften der Schule durchgeführt. Folgende Kriterien sind dabei zu beachten: die Touren sollen so nahe wie möglich am tatsächlichen Schulweg der Kinder liegen, die gewählte Strecke soll möglichst verkehrsberuhigt und sicher sein und alle Gruppen sollen die vorgegebene Dauer von vier Unterrichtseinheiten einhalten. Im Zuge dieser Masterarbeit wurde versucht diese Touren mit dem Branch-and-Bound-Verfahren und der Cutting-Plane-Methode zu verbessern.

Anhang A

Koordinaten der Knoten

Nummer	x-Koordinate	y-Koordinate	Bezeichnung
1	0	0	Schule
2	-9,4	8	Schüler*in
3	-1,5	0,9	Schüler*in
4	-1,8	1	Schüler*in
5	-5	8,2	Schüler*in
6	2,9	0,6	Schüler*in
7	2,5	-0,8	Schüler*in
8	2,2	0	Schüler*in
9	-0,3	3,3	Schüler*in
10	-2,2	9	Schüler*in
11	1,6	4,2	Schüler*in
12	-3,6	1,7	Schüler*in
13	0,8	-3,4	Schüler*in
14	-0,6	-5,6	Schüler*in
15	-13,9	-14,7	Schüler*in
16	-15	-15,4	Schüler*in
17	-5,7	-3,8	Schüler*in
18	-1,2	-6,6	Schüler*in
19	-21,9	-12,8	Schüler*in
20	9,9	4,1	Schüler*in
21	7,7	-0,2	Schüler*in
22	2,3	3,7	Schüler*in
23	-2,2	7,8	Schüler*in
24	10,9	0	Schüler*in
25	10,4	-0,7	Schüler*in
26	5,4	5,6	Schüler*in
27	3,8	7	Schüler*in
28	1,8	6,8	Schüler*in
29	1,5	3	Schüler*in
30	5,7	-0,1	Schüler*in
31	4,1	-0,7	Schüler*in
32	-2,4	5,8	Schüler*in
33	14,8	-6,2	Schüler*in
34	0,1	-5,6	Schüler*in
35	6,6	-3,7	Schüler*in
36	3,2	-4	Schüler*in
37	15	-9	Schüler*in
38	4,5	-3,7	Schüler*in
39	1	-1	Schüler*in
40	-1	-11,7	Schüler*in

41	-1	-12	Schüler*in
42	4,4	-12,7	Schüler*in
43	3,6	-12,7	Schüler*in
44	0	-16	Schüler*in
45	1,8	-3,9	Bushaltestelle
46	5,5	-10,5	Schüler*in
47	0	-12	Schüler*in
48	7,9	-10,8	Schüler*in
49	11	-9,4	Schüler*in
50	11	-12	Schüler*in
51	12,9	-12	Schüler*in
52	13,1	-10,9	Schüler*in
53	10,2	-12	Schüler*in
54	11,7	-17,9	Schüler*in
55	11,4	-17,6	Schüler*in
56	17,1	-9,4	Schüler*in
57	17,1	-8,6	Schüler*in
58	11,8	-11,2	Schüler*in
59	15,1	-3,5	Schüler*in
60	17,2	-3,8	Schüler*in
61	5,4	-3	Schüler*in
62	11,7	-4,2	Schüler*in
63	6,2	-0,7	Schüler*in
64	7,7	-0,9	Schüler*in
65	12,5	-1,1	Schüler*in
66	18,4	-3,9	Schüler*in
67	-25,7	20,9	Schüler*in
68	-27,5	21,4	Schüler*in
69	-24,6	22,1	Schüler*in
70	-23,3	22,1	Schüler*in
71	-23,8	20,9	Schüler*in
72	-21,5	21	Schüler*in
73	-35,4	17,3	Schüler*in
74	6,2	-20,2	Schüler*in
75	6	-20,8	Schüler*in
76	5,4	-21,9	Schüler*in
77	3,7	-27,2	Schüler*in
78	2,9	-26,7	Schüler*in
79	2,9	-27,3	Schüler*in
80	2,2	-29,7	Schüler*in
81	4,5	-20,1	Schüler*in
82	-21,5	20	Pause Spielplatz 1
83	-6,4	-2,5	Pause Spielplatz 2
84	6,2	6	Pause Spielplatz 3
85	14,8	-2,8	Pause Spielplatz 4
86	7,9	-11,5	Pause Spielplatz 5

87	4,6	-23,6	Pause Spielplatz 6
88	2,5	-0,8	Schüler*in
89	-32,7	19,8	Pause Spielplatz 7

Anhang B

Entfernungsmatrix der Gruppe 3

	Schule 1	13	14	15	16	17	18	19	Pause 83	Bushaltestelle 45
Schule 1	-	4	5	14	18	9	6	21	7	5
13	4	-	2	14	15	9	3	20	8	1
14	5	2	-	15	14	8	2	19	6	3
15	17	14	12	-	1	13	11	6	16	14
16	18	14	13	1	-	14	11	6	16	15
17	8	8	7	13	14	-	5	19	3	8
18	7	3	3	11	12	6	-	17	7	3
19	23	19	18	5	5	19	16	-	20	19
Pause 83	5	7	5	15	16	2	6	20	-	9
Bushaltestelle 45	5	1	3	14	15	9	3	20	11	-

Anhang C

Modellierung in Xpress, Gruppe 3

„.dat“-Dokument:

```
!Data file for 'tsp3Bus.mos'

!Route 3

DIST: [100000 4 5 14 18 9 6 21 7 5
        4 100000 2 14 15 9 3 20 8 1
        5 2 100000 15 14 8 2 19 6 3
        17 14 12 100000 1 13 11 6 16 14
        18 14 13 1 100000 14 11 6 16 15
        8 8 7 13 14 100000 5 19 3 8
        7 3 3 11 12 6 100000 17 7 3
        23 19 18 5 5 19 16 100000 20 19
        5 7 5 15 16 2 6 20 100000 9
        5 1 3 14 15 9 3 20 11 100000]
```

„.mos“-Dokument:

```
!Route 3
model "Tour planning Route3Bus"
uses "mmxprs", "mmsvg";

forward procedure break_subtour
forward procedure print_sol

declarations
    NHOMES = 10
    HOMES = 1..NHOMES    !Homes
    DIST: array(HOMES,HOMES) of integer    !Entfernungen zwischen den Häusern (Homes)
    NEXTH: array(HOMES) of integer    !Nächstes Haus nach i in der Lösung

    walk: array(HOMES,HOMES) of mpvar    !1 wenn walk von i nach j
end-declarations

initializations from 'tsp3Bus.dat'
    DIST
end-initializations

!Zielfunktion: minimiere die Gesamtlänge
TotalDIST:= sum(i,j in HOMES | i<>j) DIST(i,j)*walk(i,j)

!jedes Haus soll einmal besucht werden
forall(i in HOMES) OneVisitI(i):= sum(j in HOMES | i<>j) walk(i,j) = 1
forall(j in HOMES) OneVisitJ(j):= sum(i in HOMES | i<>j) walk(i,j) = 1

forall(i,j in HOMES | i<>j) walk(i,j) is_binary

!minimiere die Zielfunktion
minimize(TotalDIST)

!Eliminiere Subtours
break_subtour
```

```

svgwaitclose("Close browser window to terminate model execution.", 1)

!-----

procedure break_subtour
  declarations
    TOUR, SMALLEST, ALLHOMES: set of integer
  end-declarations

  forall(i in HOMES)
    NEXTH(i) := integer(round(getsol(sum(j in HOMES) j*walk(i,j) )))

  !Zeige Lösung
  print_sol

  !Zeige die Subtour
  TOUR:={}
  first:=1
  repeat
    TOUR+={first}
    first:=NEXTH(first)
  until first=1
  size:=getsize(TOUR)

  !Finde die kleinste Subtour
  if size < NHOMES then
    SMALLEST:=TOUR
    if size>2 then
      ALLHOMES:=TOUR
      forall(i in HOMES) do
        if(i not in ALLHOMES) then
          TOUR:={}
          first:=i
          repeat
            TOUR+={first}
            first:=NEXTH(first)
          until first=i
          ALLHOMES+=TOUR
          if getsize(TOUR)<size then
            SMALLEST:=TOUR
            size:=getsize(SMALLEST)
          end-if
          if size=2 then
            break
          end-if
        end-if
      end-do
    end-if

    !eine subtour breaking constraint
    sum(i in SMALLEST) walk(i,NEXTH(i)) <= getsize(SMALLEST) - 1

    !auch in die andere Richtung muss die Subtour verboten werden
    if SMALLEST.size>2 then
      sum(i in SMALLEST) walk(NEXTH(i),i) <= getsize(SMALLEST) - 1
    end-if

    !subtour elimination constraint
    sum(i in SMALLEST,j in HOMES-SMALLEST) walk(i,j) >= 1

    !löse das Problem noch einmal

  minimize(TotalDIST)

```

```

if not svgclosing then break_subtour; end-if

end-if
end-procedure

```

```

!-----

```

```

!Zeige die Lösung
procedure print_sol
  declarations
    ALLHOMES: set of integer
  end-declarations

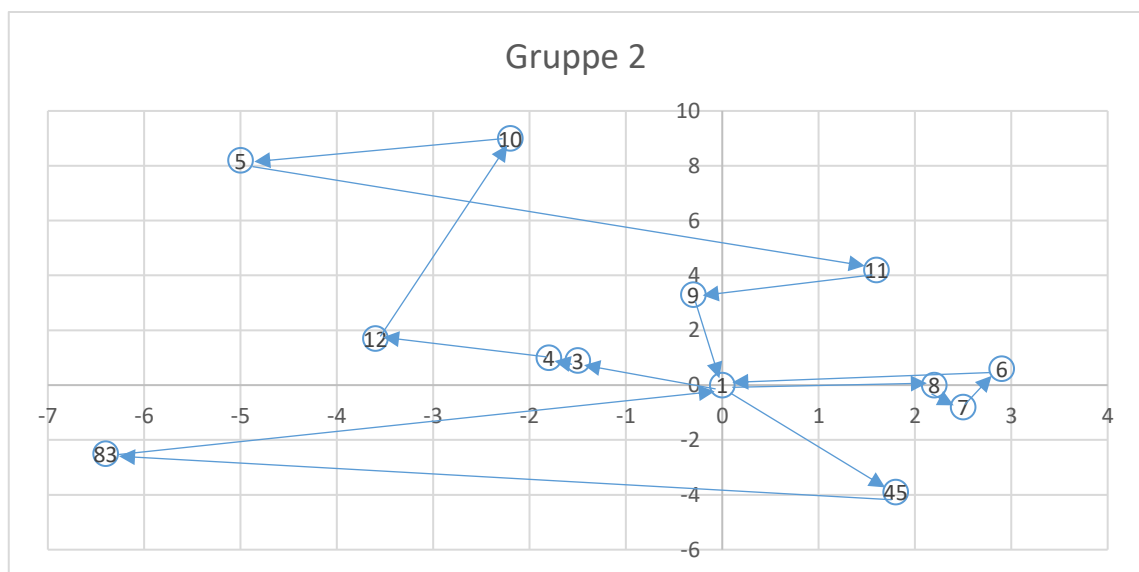
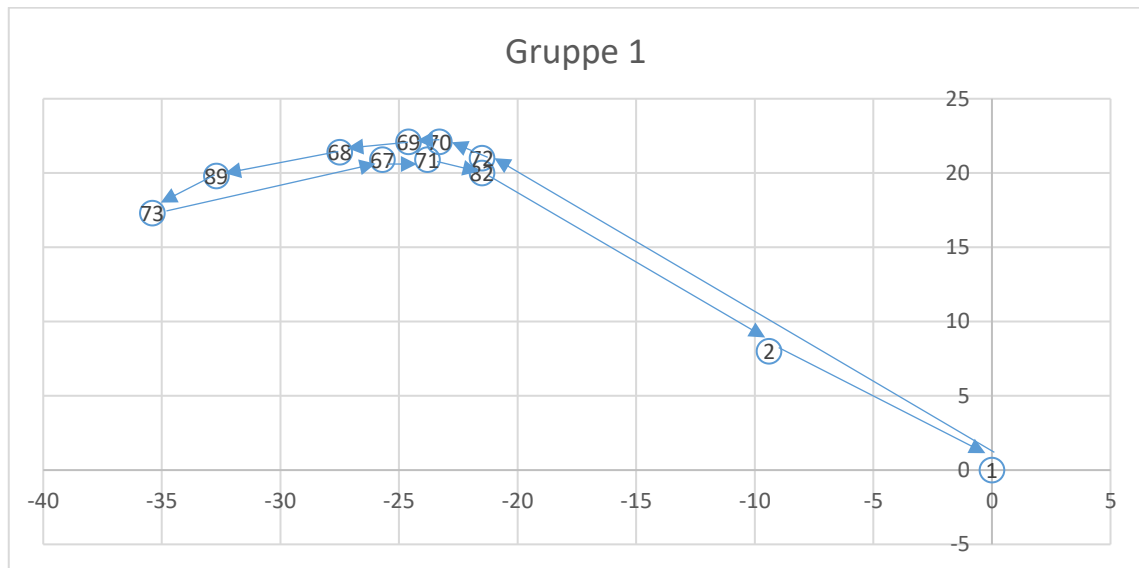
  writeln("Total distance: ", getobjval)
  forall(i in HOMES) do
    write(i)
    first:=i
    repeat
      ALLHOMES+={first}
      write("-", NEXTH(first))
      first:=NEXTH(first)
    until first=i
    writeln
  end-do
end-procedure

end-model

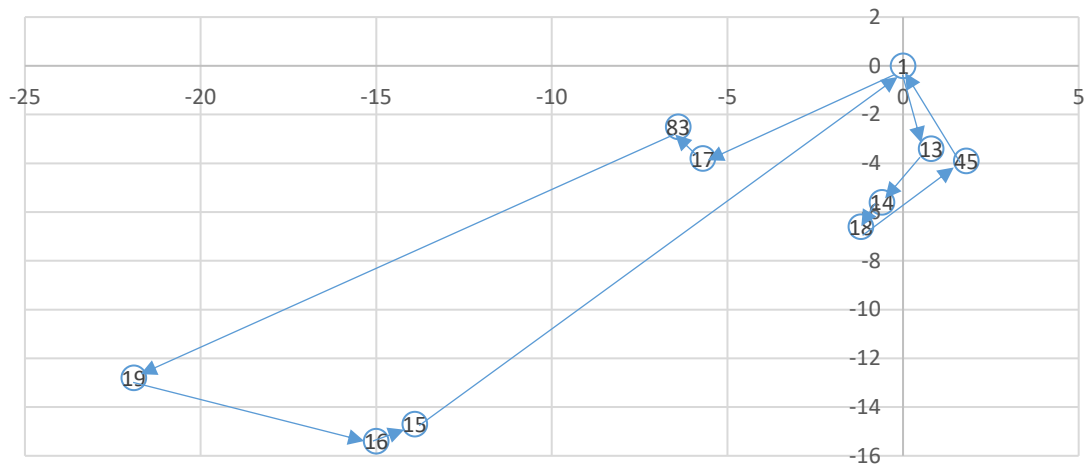
```

Anhang D

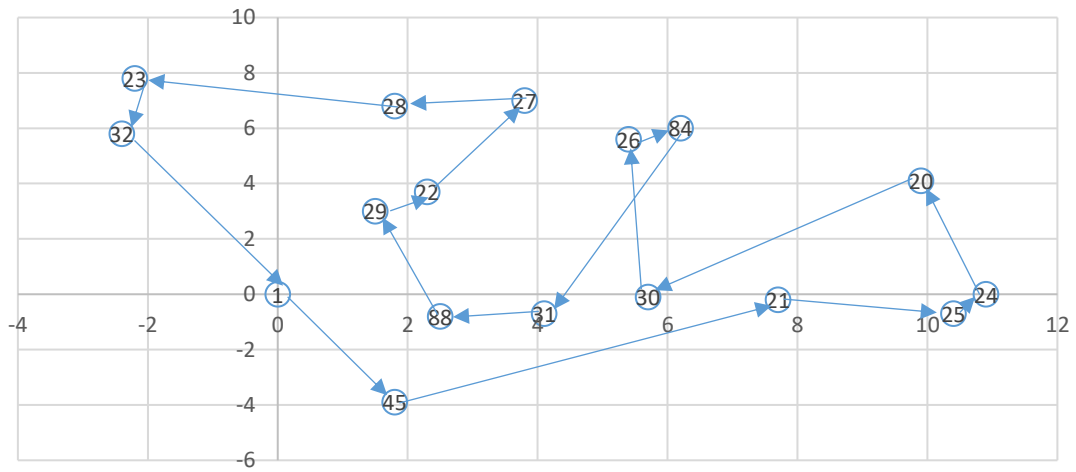
Berechnete Touren



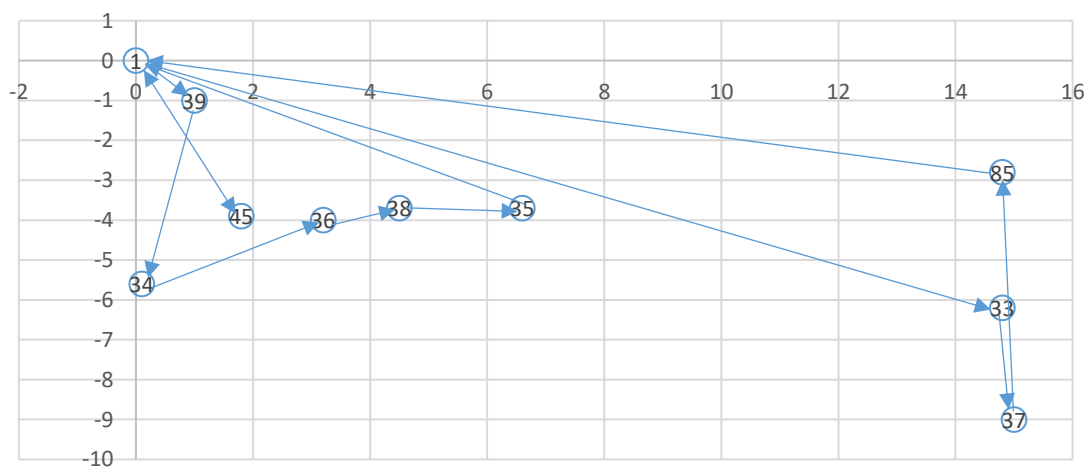
Gruppe 3



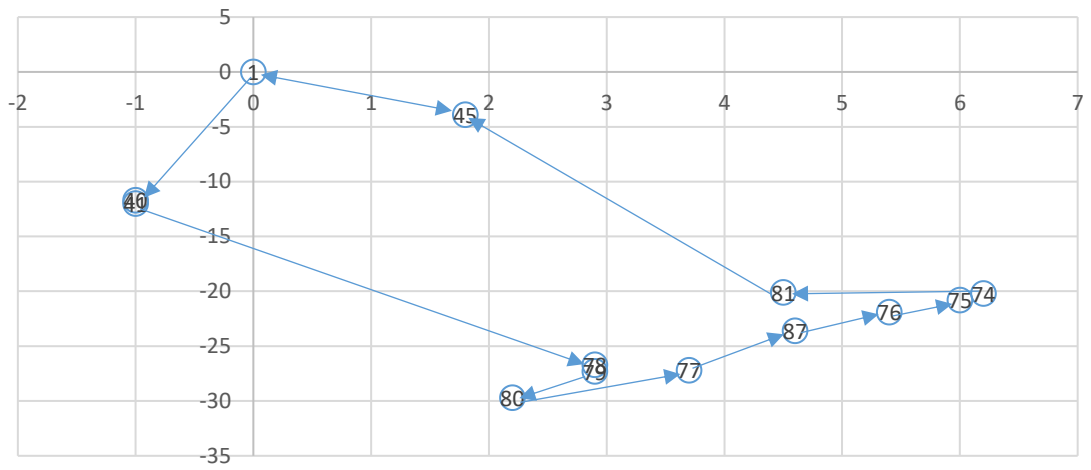
Gruppe 4



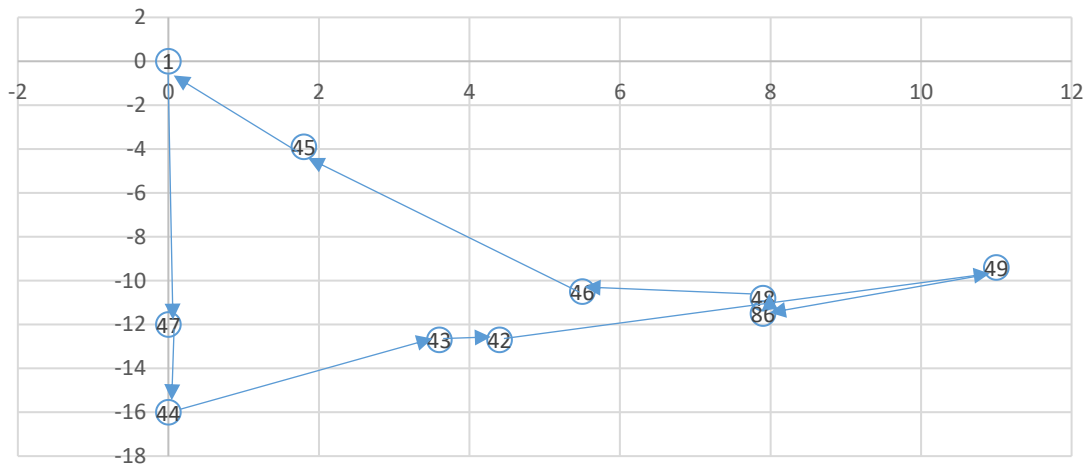
Gruppe 5



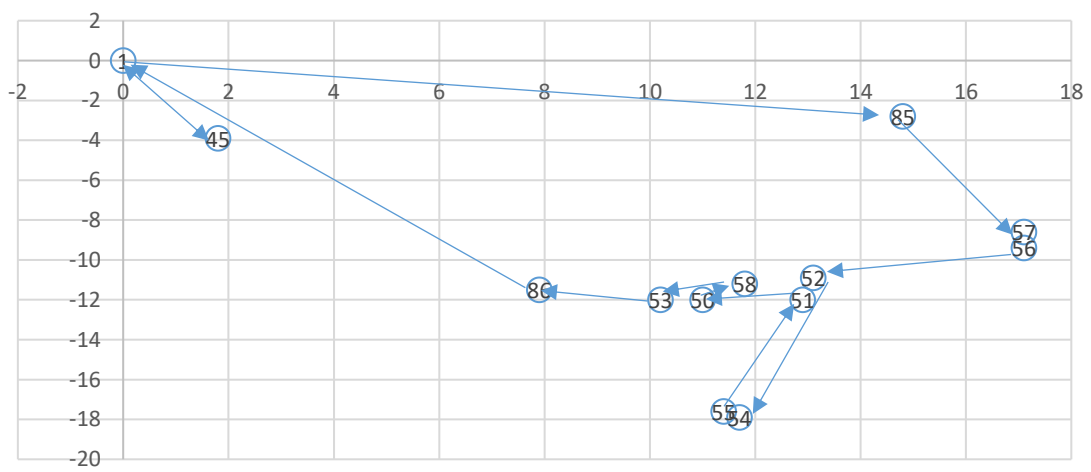
Gruppe 6

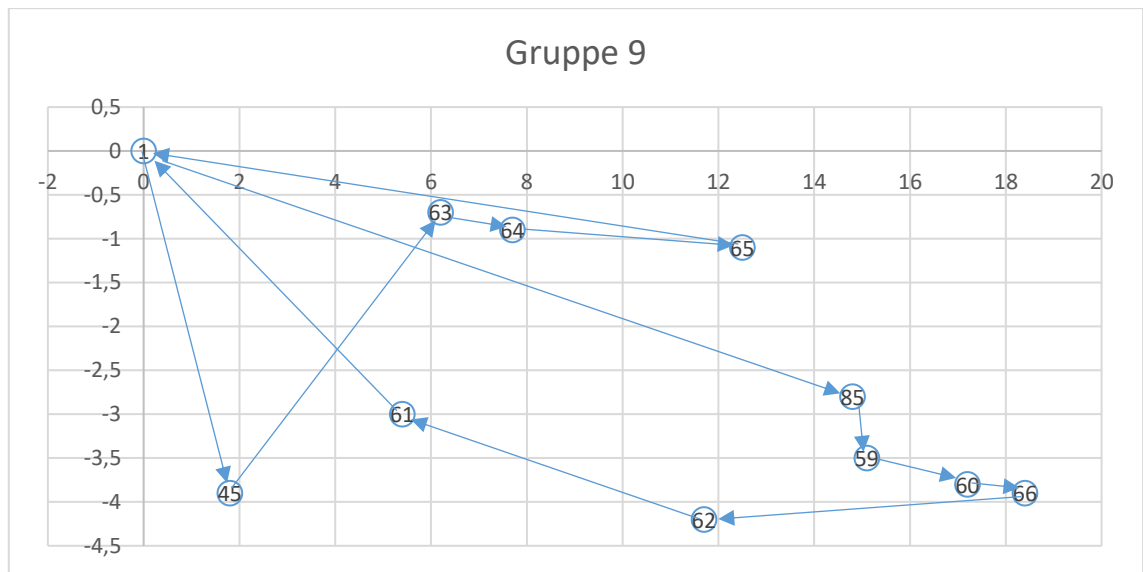


Gruppe 7



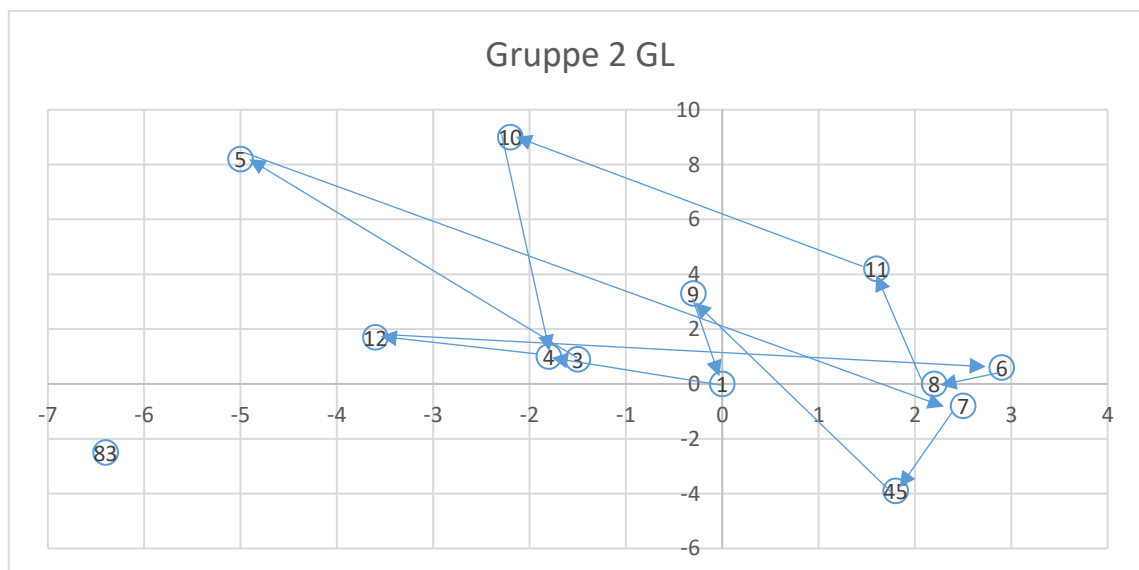
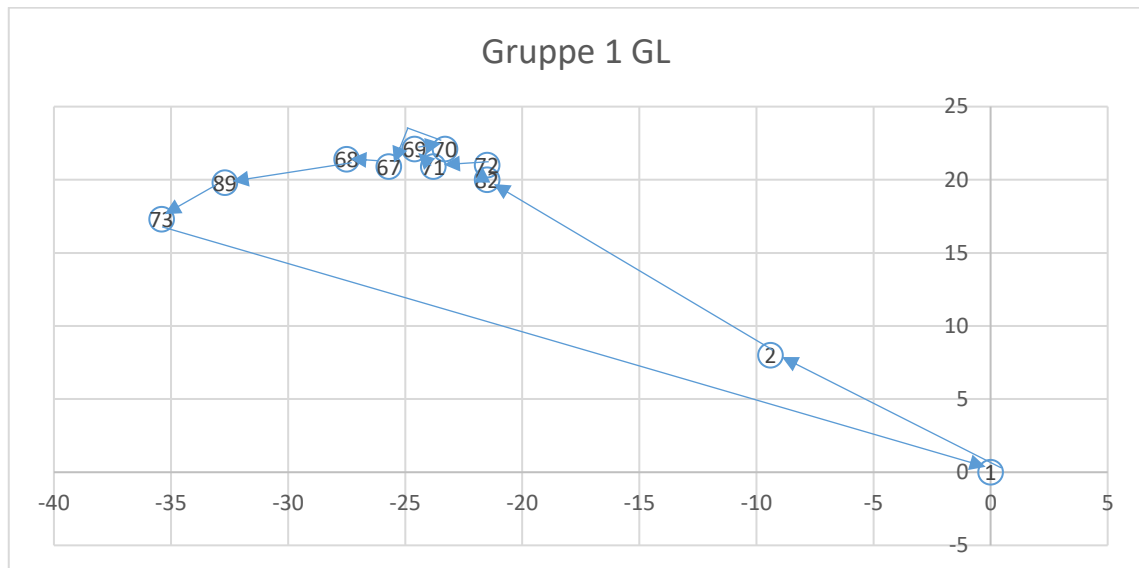
Gruppe 8



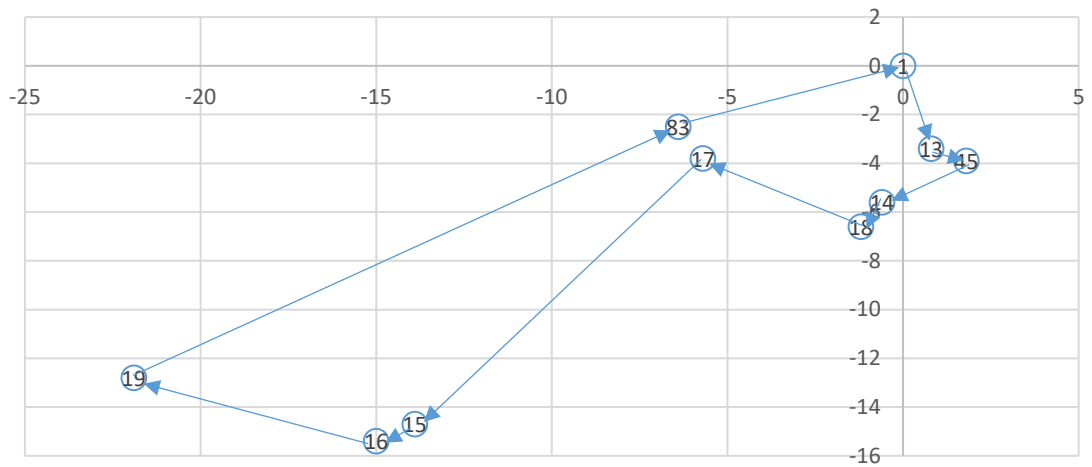


Anhang E

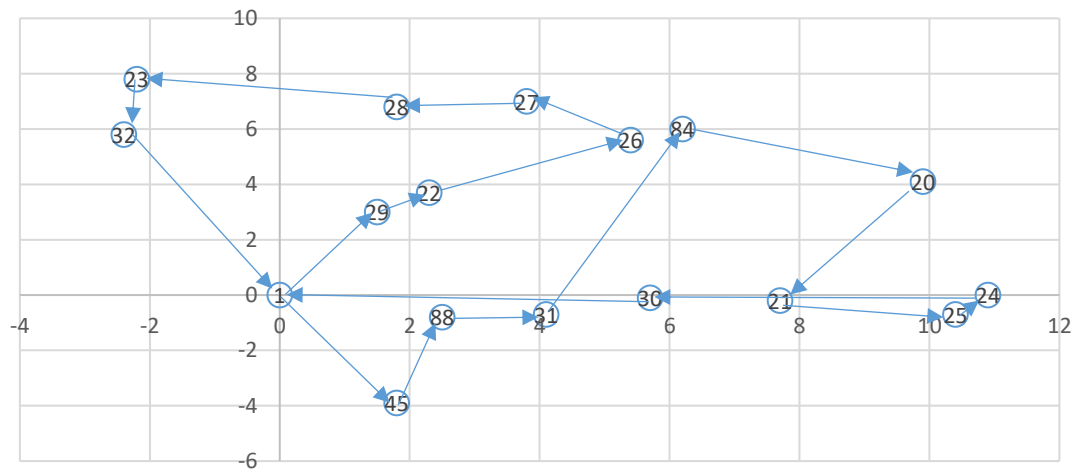
Touren der Gruppenleiter*innen



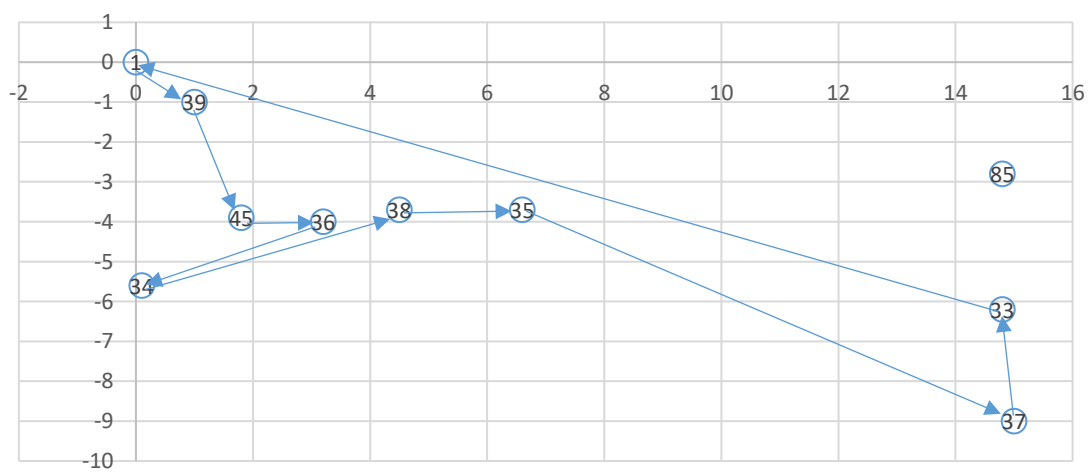
Gruppe 3 GL



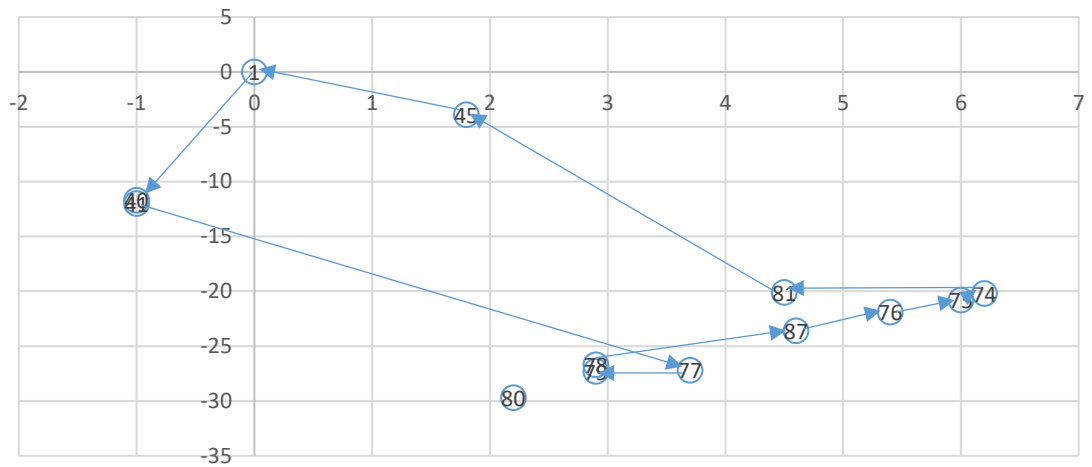
Gruppe 4 GL



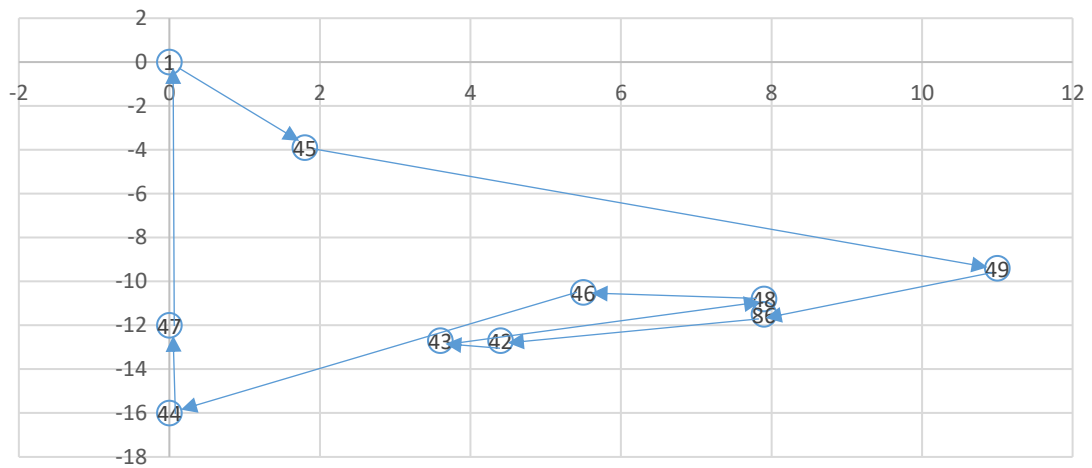
Gruppe 5 GL



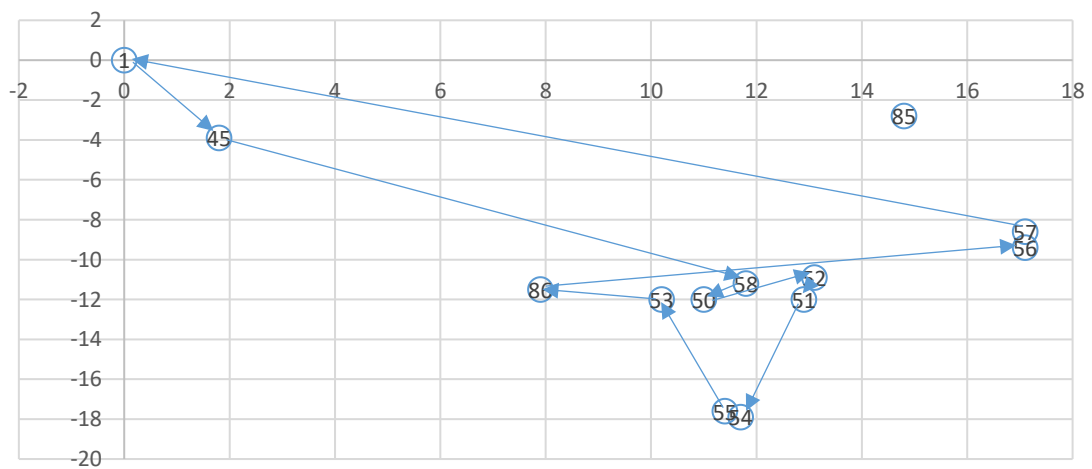
Gruppe 6 GL

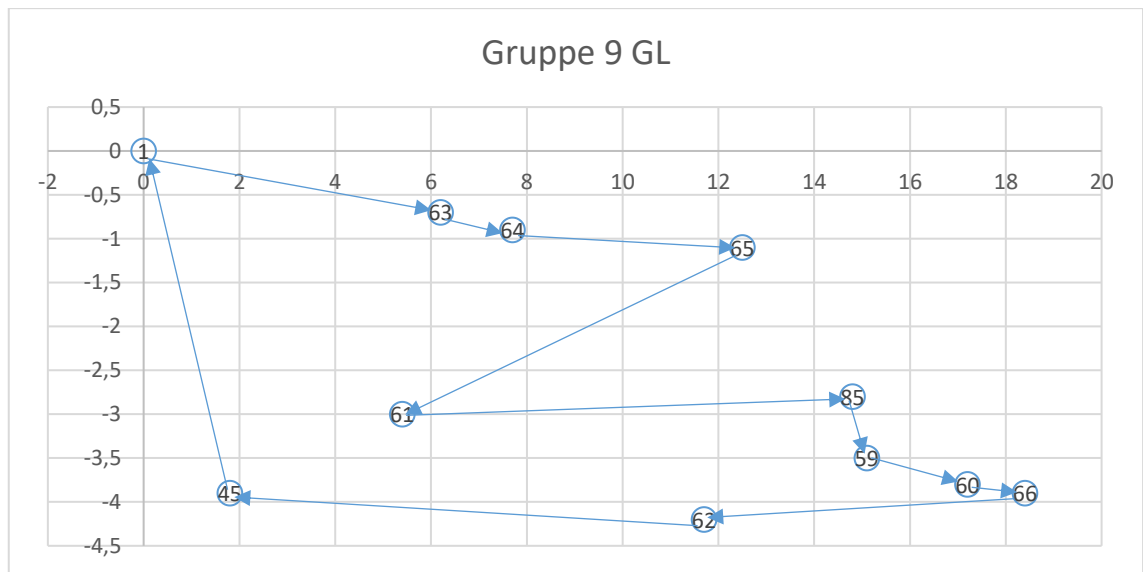


Gruppe 7 GL



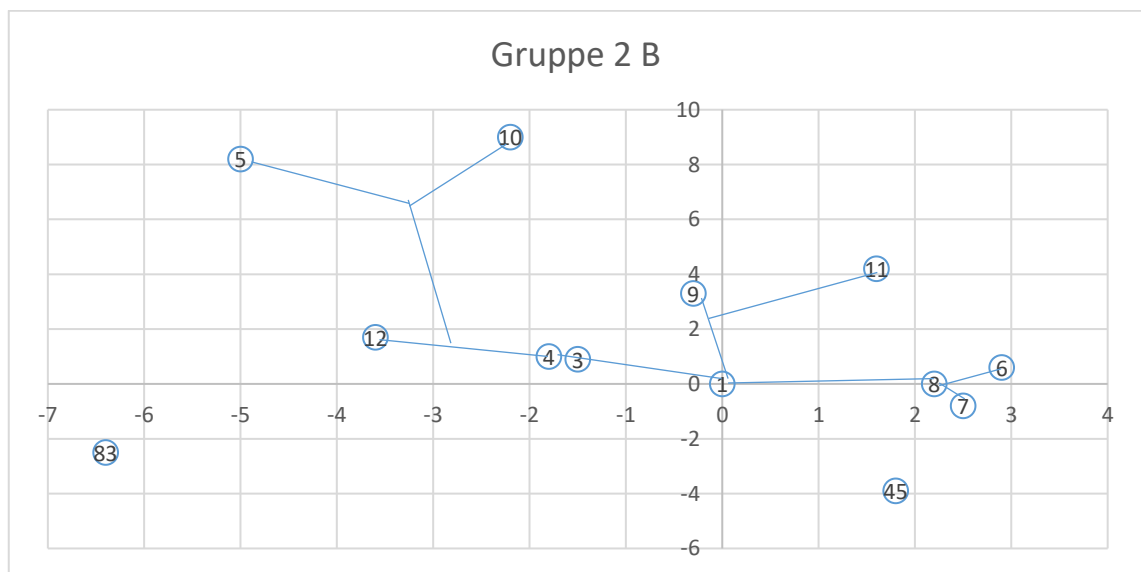
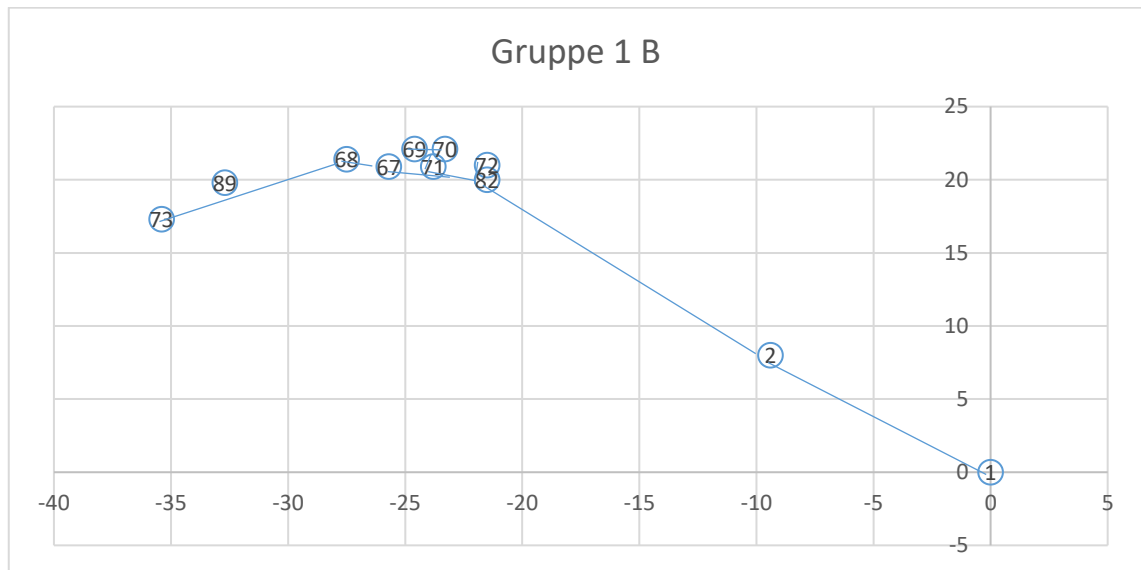
Gruppe 8 GL



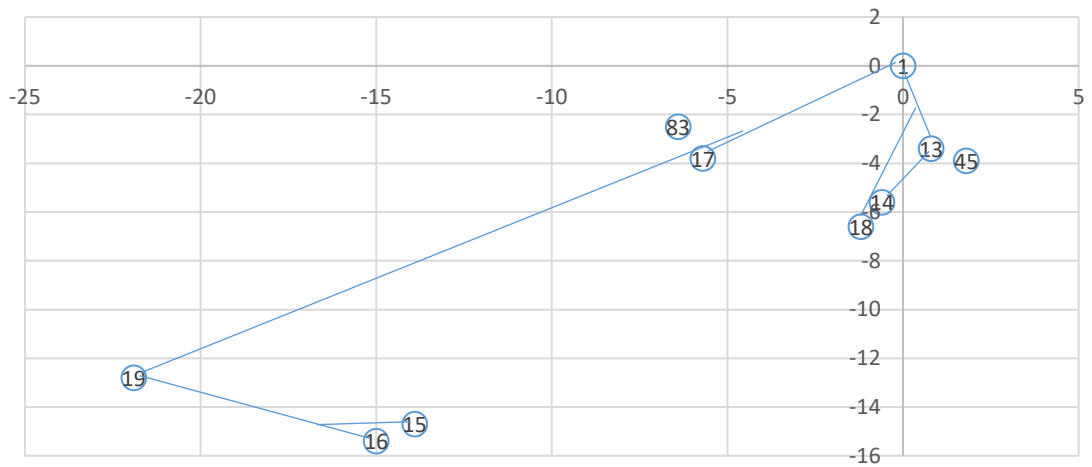


Anhang F

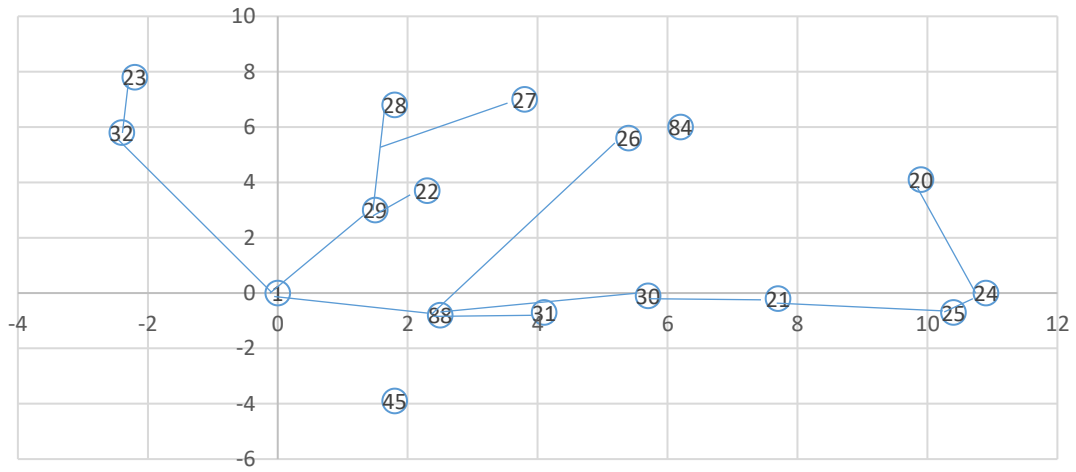
Bäume



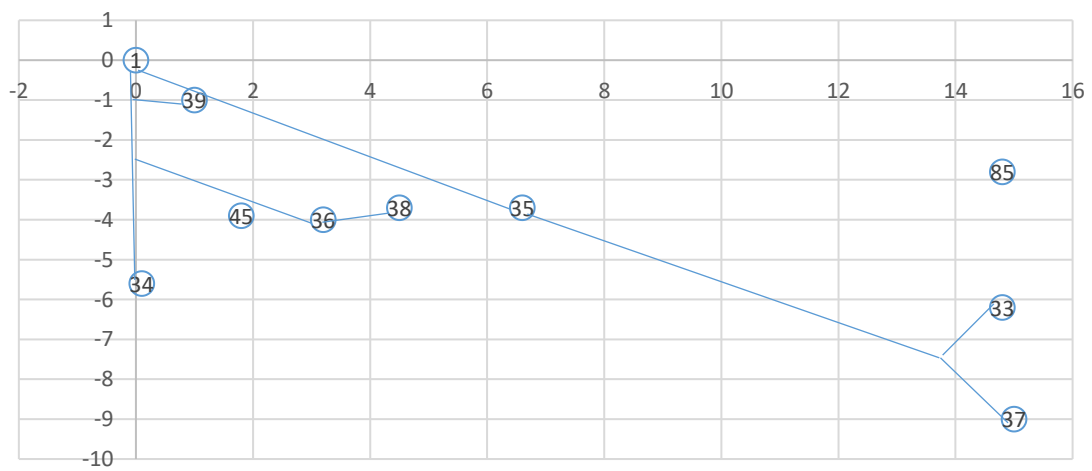
Gruppe 3 B



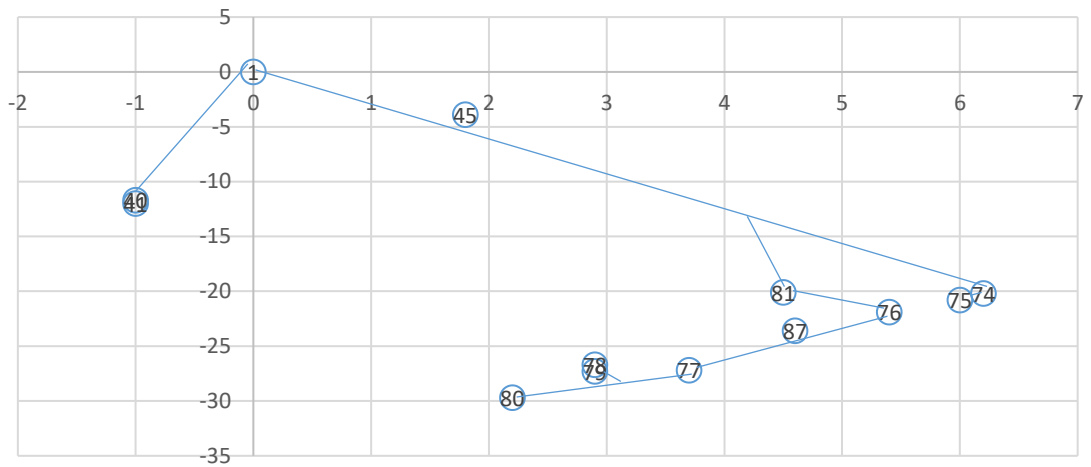
Gruppe 4 B



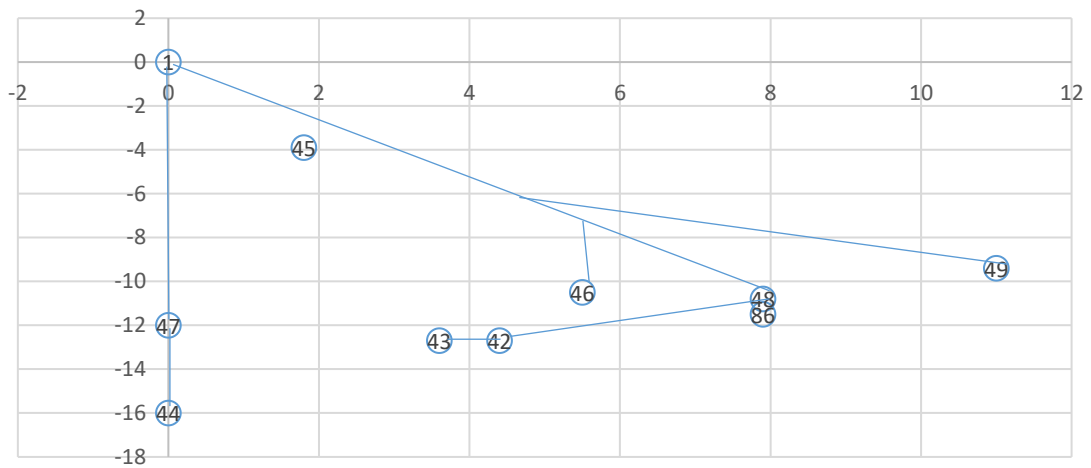
Gruppe 5 B



Gruppe 6 B



Gruppe 7 B



Gruppe 8 B

